Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf die Änderung des elektrischen Leitungswiderstandes von Eisen, Nickel, Kupfer und Wismut.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

hohen philosophischen Fakultät

der

UNIVERSITÄT BASEL

von

Otto Schwab

aus Gals (Kt. Bern).

Zürich

Druck von Zürcher & Furrer

1912.

Untersuchungen über den Einfluss der Temperatur auf die Änderung des elektrischen Leitungswiderstandes von Eisen, Nickel, Kupfer und Wismut.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der

hohen philosophischen Fakultät

der

UNIVERSITÄT BASEL

von

Otto Schwab

aus Gals (Kt. Bern).

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Zürich

Druck von Zürcher & Furrer

1912.

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der HH. Professoren Dr. A. Hagenbach und K. Von der Mühll.

Basel, den 18. Oktober 1911.

John Meier,
Dekan.

Abdruck aus
„Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich"
Jahrgang 56, 1911.

Meinen lieben Eltern

aus Dankbarkeit gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546707_0091

I. Einleitung.

Die Tatsache, dass der elektrische Leitungswiderstand der Metalle wächst, wenn diese eine Temperaturerhöhung erfahren, war schon im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts bekannt.

Die ersten zuverlässigen Untersuchungen auf diesem Gebiet stammen wohl von Mathiessen[1]). Er hat im Jahre 1862 gefunden, dass die elektrische Leitfähigkeit, d. h. der reziproke Wert des elektrischen Widerstandes für 10 verschiedene Metalle der Gleichung gehorcht:

$$c_t = c_o (1 - 0{,}003\,767\,4\, t + 0{,}000\,008\,34\, t^2)$$

worin t die Temperatur, c_o die Leitfähigkeit bei 0° C und c_t die Leitfähigkeit bei der Temperatur t^0 bedeuten.

Nach dieser Formel würde aber schon bei 226° die Leitfähigkeit bei einem Minimum angelangt und bei 452° wieder gleich c_o sein. Diese, den Tatsachen widersprechenden Resultate rühren davon her, dass Mathiessen seine Untersuchungen über ein zu kleines Temperaturintervall ausgedehnt hat.

Nachdem dann W. Siemens[2]) im Jahre 1871 und H. L. Callendar[3]) 1886 gezeigt hatten, wie mit Hülfe von Platinpyrometern (s. u. II, C.) sowohl sehr niedrige als auch sehr hohe Temperaturen leicht bestimmbar sind, wurden von einer grossen Reihe von Physikern genauere Untersuchungen an den verschiedensten Metallen ausgeführt.

Spezielle Untersuchungen an Eisendrähten ergaben bald, dass dieses Metall sich dem obigen Gesetz nicht anschliesst. Während fast bei allen Metallen einer gleichmässigen Temperatursteigerung eine ebensolche Widerstandszunahme entspricht, zeigt es sich beim Eisen, dass diese Widerstandsvergrösserung bis zu einer bestimmten Temperatur relativ langsam vor sich geht, dann sehr rasch wächst, um bei sehr hohen Temperaturen wieder nur langsam fortzuschreiten.

---

[1]) Poggendorff Annalen 115, 118, 122.

[2]) Phil. Mag. (5), 42.

[3]) Proc. Roy. Soc. 41; Trans. Roy. Soc. London 178[A], 182[A]; Phil. Mag. (5), 32, 33, 47, 48.

Eine ganz ähnliche Eigenschaft zeigt das Nickel.

Da diese beiden Metalle leicht magnetisierbar sind, lag es nahe, dieses eigentümliche Verhalten mit ihren magnetischen Eigenschaften in Verbindung zu bringen.

W. Kohlrausch[1]) hat im Jahre 1887 verschiedene Eisen-, Stahl-, Nickel- und Platindrähte nach dieser Richtung geprüft, indem er sie mit Hülfe des elektrischen Stromes in Wasserstoff-, resp. Leuchtgas, bis zur Weissgluht erhitzte, unter gleichzeitiger Messung von elektrischem Leitungswiderstand, Magnetisierbarkeit und des zur Erhitzung nötigen Arbeitsaufwandes, während er die jeweiligen Temperaturen nicht bestimmt hat.

Bei allen seinen Untersuchungen hat sich ergeben, dass der Widerstand der magnetisierbaren Metalle gerade dort am raschesten zunimmt, wo die Magnetisierbarkeit plötzlich abfällt. Er kommt daher zu folgendem Schluss: „Es kann kaum noch ein Zweifel bestehen, dass die Magnetisierbarkeit selbst der Grund für den steilen Verlauf der Widerstandskurven der Eisensorten und des Nickels ist, besonders sobald man in Betracht zieht, dass der flache Verlauf der Kurven nichtmagnetischer Metalle (Kupfer, Platin) sich auch bei Nickel und Eisen sofort einstellt, wenn bei hoher Temperatur die Magnetisierbarkeit fehlt."

Kohlrausch macht ferner darauf aufmerksam, dass selbst grosse Differenzen der spezifischen Widerstände verschiedener Eisensorten bei Zimmertemperatur auf wenige Prozente bei höhern als der Entmagnetisierungstemperatur zurücksinken. So hatte er z. B. bei normaler Temperatur für Gusstahl, käufliches Eisen und elektrolytisches Eisen die spez. Widerstände 0,194; 0,149; 0,119 gefunden und im Moment des Verschwindens der Magnetisierbarkeit:

1,09; 1,07; 1,18.

Die Frage, ob eventuell nicht auch die starken Heizströme (bis zu 83 Amp.) den Widerstand beeinflussen könnten, hat Kohlrausch auch geprüft und ist durch seine Versuche zu einer verneinenden Antwort gekommen, im Gegensatz zu F. Auerbach[2]), der im Jahre 1878 aus seinen zahlreichen Untersuchungen erkannte, dass der Widerstand magnetisch polarisierbarer Metalle vom durchgehenden Strom vergrössert werde.

Im Jahre 1886 hat C. G. Knott[3]) genaue Untersuchungen an Nickeldrähten angestellt, wobei er u. a. zu folgendem Schluss ge-

[1]) Wiedemann Annalen Bd. 33.
[2]) Wied. Ann. 5.
[3]) Trans. of the Roy. Soc. Edinburgh 33.

kommen ist: . . . „Between the limits of temperature specified (200°—320° C), the slop of the resistance curve is much steeper than for any other temperature. The same peculiarity is probably possessed by iron between the temperatures of a dull red and a bright red heat. . . .“

Zum genau gleichen Resultat ist 1888 A. Battelli[1]) durch seine Untersuchungen gekommen.

Nach J. Hopkinson[2]) wächst der Widerstand eines Eisendrahtes mit steigender Temperatur erst langsam, dann etwas schneller bis dicht unterhalb 855° und von dort an plötzlich wieder langsam.

H. Le Chatelier[3]) hat eine ganze Reihe von Eisen- und Nickelsorten, sowie eine Anzahl ihrer Legierungen untersucht. Für weiches Eisen, halb und ganz gehärtete Stahldrähte findet er beim Erhitzen in reinem Wasserstoff Umwandlungspunkte bei 710° und 850°, für Stahl mit 3 % Silicium nur bei 850°, während Manganstahl, also eine Legierung, und Platin keine Knickung aufweisen.

Le Chatelier erklärt sich diese Erscheinungen durch die Annahme, es seien die Metalle bei diesen Temperaturen molekularen Veränderungen unterworfen, und Hopkinson weist darauf hin, dass die Temperatur dieser plötzlichen Widerstandsänderung sehr nahe der Entmagnetisierungstemperatur (für Nickel unterhalb 400°, für Eisen bei ca. 870°) des Metalles liege.

Nun hat schon im Jahre 1885 C. Heim[4]) durch seine Untersuchungen nachgewiesen, dass die unter dem Namen Gore'sches Phänomen bekannte Rekaleszenzerscheinung beim Abkühlen des Eisens und Stahles mit dem Wiedereintritt der Magnetisierbarkeit stets genau zusammenfällt und dass diese kritische Temperatur vom Kohlenstoffgehalt abhängt. Diese plötzliche, molekulare Veränderung wäre nach Gores Ansicht als eine Verminderung der Kohäsion bei der bestimmten Temperatur zu betrachten.

W. Kohlrausch[5]) konnte diese Erscheinung auch an chemisch reinem Eisen sehr deutlich wahrnehmen, was Heim, wohl aus technischen Gründen, nicht gelungen ist.

Dass der magnetische Zustand des Metalles tatsächlich auf die Grösse seines elektrischen Widerstandes einen Einfluss ausübt, haben eine grosse Reihe von Forschern nachgewiesen. Von allen diesen Arbeiten seien hier nur noch einige erwähnt:

---

[1]) Atti della Reale Accad. di Torino 22.
[2]) Proc. Roy. Soc. London 45.
[3]) Comptes Rendus 110, 112.
[4]) C. Heim, Untersuchungen über die Gore'schen Phänomene.
[5]) Wied. Annalen 33.

Goldhammer[1]) fand im Jahre 1887, dass sich der elektrische Widerstand des Eisens und Nickels bei Längsmagnetisierung vergrössert, bei Quermagnetisierung verkleinert, ein Resultat, auf das Tomlinson[2]) schon im Jahre 1882 gestossen war.

Aber auch diamagnetische Körper erleiden im Kraftfeld eine Einwirkung. So haben Righi[3]), Hurion[4]), Leduc[5]) und von Ettingshausen[6]) durch ihre Untersuchungen nachgewiesen, dass der Widerstand von Wismutplatten um 12 bis 16 Prozent zunehmen kann, wenn diese in einem starken, magnetischen Feld normal zu den Kraftlinien aufgestellt werden.

G. Faè[7]) hat 1887 gefunden, dass der Widerstand einer Eisendrahtrolle im magnetischen Kraftfeld immer vergrössert werde. Steht die Axe der Rolle senkrecht zu den Kraftlinien, so ist die Steigerung grösser, als wenn sie parallel zu den Kraftlinien ist.

Bei den gleichen Temperaturen, bei welchen Eisen und Nickel Unregelmässigkeiten in bezug auf den elektrischen Widerstand zeigen, verlieren diese Metalle auch ihre Magnetisierbarkeit.

Tomlinson[8]) fand z. B. im Jahre 1888, dass Nickeldrähte bei Temperaturen von 333° C bis 412° C unmagnetisch werden, je nach der Stärke des Feldes.

Nils Grane[9]) hat 1893 als Entmagnetisierungstemperatur für Nickel 368° bis 481° und für Eisen 735° bis 831°, je nach der Intensität des Feldes, beobachtet.

Hopkinson[10]) hat durch besondere Versuchseinrichtung die Rekaleszenzerscheinung einer Stahlsorte ebenfalls beobachtet. Er berichtet, dass bei regelmässiger Abkühlung die Temperatur von 680° plötzlich auf 712° gestiegen sei, und dass die daherige Wärmeproduktion 173 mal so gross war, wie die bei normaler Abkühlung während einer Sekunde abgegebene Wärmemenge. Nach seiner Messung ging die Magnetisierbarkeit bei der Temperatur von 690° verloren. Für eine Reihe verschiedener Eisen- und Stahlsorten hat er „kritische" Temperaturen von 690° bis 870° gemessen.

Nach Versuchen von C. G. Knott[11]) ist der Temperaturkoeffizient

---

[1]) Pogg. Annalen 31 N. F.
[2]) Proc. Roy. Soc. London 33.
[3]) Journ. de Physique (2) 3.
[4]) Compt. Rend. 98.
[5]) C. R. 98 et 102.
[6]) Wien. Ber. 94.
[7]) Ist. Venet. Atti (6) 5.
[8]) Phil. Mag. (5) 25.
[9]) Acta Univ. Lundunis 30.
[10]) Phil. Trans. 180.
[11]) Edinb. Trans. (1) 33.

(Zunahme des Widerstandes 1^{2} pro 1^{0} C Temperaturerhöhung) beim Eisen grösser als beim Nickel. Für das letztere Metall nimmt er von 200^{0} bis 320^{0} merklich zu, um nachher wieder zu fallen. Knott weist ferner darauf hin, dass die von Tait[1]) beobachtete thermoelektrische Anomalie (Zeichenwechsel des Thomsoneffektes) mit den gleichen Temperaturen zusammenfällt.

Von den aus neuerer Zeit stammenden Resultaten mögen folgende erwähnt werden:

Nagaoka und S. Kusakabe[2]) haben als Rekaleszenztemperatur für Eisen 780^{0}, für Nickel 430^{0} und für Stahl 800^{0} gemessen, Werte, die mit zunehmender Feldstärke grösser werden, und die bei Erwärmung und Abkühlung verschieden ausfallen.

Auf ähnliche Resultate sind Guy Barlow[3]) und Dongier[4]) gestossen.

C. G. Knott[5]) findet für Nickel eine Vergrösserung des Widerstandes um gleichviel bei Magnetisierung bei allen Temperaturen im Intervall von 10^{0} bis 170^{0}.

Im Jahre 1907 hat der gleiche Physiker weitere Versuchsresultate[6]) mitgeteilt. Nach diesen sind die Widerstandsänderungen eines Nickeldrahtes, hervorgerufen durch ein transversales, magnetisches Kraftfeld bei ca. 295^{0} C am kleinsten. Von dort an wachsen sie mit zunehmender Temperatur, erreichen ein Maximum bei ca. 310^{0} und fallen von dort rasch zu Null ab. Diese Erscheinungen traten um so deutlicher zutage, je stärker die Kraftfelder gewählt wurden. Knott weist darauf hin, dass Williams ganz ähnliche Erfahrungen bei longitudinalen Kraftfeldern gesammelt hat und er zieht daraus den Schluss, dass Nickel in einem gewissen Intervall unterhalb seiner Entmagnetisierungstemperatur eine bemerkenswerte Empfindlichkeit des Einflusses der Magnetisierung auf das elektrische Leitvermögen zeigt.

Mit vorliegender Arbeit habe ich versucht, das anomale Verhalten sowohl des Eisens, als auch des Nickels als Funktion der Temperatur näher zu untersuchen und die Ergebnisse zu vergleichen mit denjenigen nichtmagnetischer Metalle.

---

[1]) Edinb. Trans. 1872/73.
[2]) Math. & Phys. Soc. Tokio 1901.
[3]) Proc. Roy. Soc. 71, 1902.
[4]) Soc. Franç. de Phys. 188, 1902.
[5]) Edinb. Trans. 1902.
[6]) Edinb. Trans. 45.

II. Versuchsanordnung und Messmethoden.

A. Beschreibung der Versuchsobjekte.

Um meine Widerstände bequem messen zu können, wählte ich sie so gross wie möglich, immerhin so, dass deren räumliche Unterbringung keine zu grossen Schwierigkeiten verursachte.

Aus dünnen Glimmerplättchen stellte ich einen Träger mit kreuzförmigem Querschnitt her (Fig. 1), auf den ich meine Versuchsdrähte bifilar aufwickeln konnte. Die beiden Enden E_1 und E_2 wurden mit Platindrähten von 1 mm Dicke vermittelst Silber verlötet und zwar so, dass z. B. von E_2 aus zwei, von E_1 aus nur ein Zuleitungsdraht nach aussen führten. (Begründung siehe Abschnitt II C.)

Fig. 1.

Diese Kombination liess ich in eine ca. 50 cm lange, am einen Ende abgeschlossene Porzellanröhre von 18 mm Lichtweite einsetzen. Die Röhre war innen und aussen glasiert. Am offenen Ende wurde ein 10 cm langes, mit einem luftdichten Abschlusshahn versehenes Glasrohr konisch eingeschliffen, das mit Wasserglas ins Porzellanrohr eingekittet werden konnte. Die drei Platindrähtchen A, B, C (Fig. 2) wurden durch dünne Glimmerscheibchen D geführt und so an gegenseitiger Berührung verhindert. Unmittelbar vor dem Glashahn wurden die drei, ganz genau gleich dimensionierten Platindrähte durch die Glaswand hindurch geführt und festgeschmolzen, so dass sie eine leitende Verbindung des zu messenden, eingeschlossenen Widerstandes nach aussen vermittelten. Direkt vor dem Glimmerkreuz wurde ein Asbestpfropfen F eingeschoben, der bei hohen Temperaturen die Strahlung in der Richtung der Röhrenaxe soviel wie möglich verhindern sollte. Das dünne Ansatzrohr G hat den Zweck, eine Verbindung mit der Quecksilberluftpumpe zu erleichtern, mit Hülfe derer ich jederzeit den ganzen Raum, in welchem der Draht untergebracht war, bis auf ca. 1 mm Druck (Hg) evakuieren konnte. Dadurch war es mir möglich, das Oxydieren der Drähte zu verhindern.

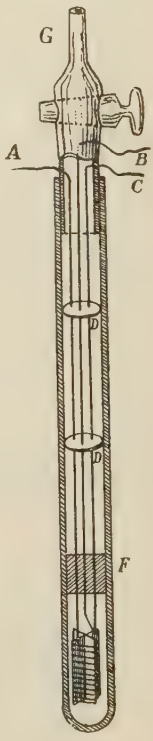


Fig. 2.

B. Herstellung der Temperaturen.

Die Temperaturen von 0°, resp. —78° C, erzielte ich für meine Widerstände durch Einsetzen in schmelzendes Eis, resp. in feste Kohlensäure.

An einem einzigen Tag stand mir flüssige Luft zur Verfügung, um so auch eine Messung bei —191° C ausführen zu können. Das Porzellanrohr tauchte mit ca. $^2/_3$ seiner ganzen Länge in die Flüssigkeit ein.

Zur Herstellung jeder beliebigen Temperatur von 20° C an aufwärts bis über 1000° hinaus, bediente ich mich eines elektrischen Glühofens von C. Heräus in Hanau. Eine 50 cm lange Porzellanröhre mit 30 mm Lichtweite ist mit einem dünnen Platinband von 0,55 Ohm Widerstand spiralig umwickelt. Die Stromzufuhr wird durch Kupferdrähte ermöglicht. Die thermische Isolation nach aussen wird besorgt durch eine zweite Röhre aus feuerfestem Ton von 20 cm Durchmesser, sowie durch die zwischen beiden Röhren eingeschlossene Luftschicht. Der Ofen wird horizontal aufgestellt.

Schickt man durch das Platinband einen elektrischen Strom (in den folgenden Versuchen ist der leichtern Konstanterhaltung wegen ausschliesslich Akkumulatorenstrom verwendet worden), so wird dieses erwärmt. Durch Variation der Stromstärke ist es leicht möglich, jede wünschbare Temperatur bis gegen 1200° C herzustellen. Wird der Strom längere Zeit konstant gelassen, und werden Luftströmungen möglichst vermieden, so gelingt es leicht, die Temperatur im Innern des Ofens einige Zeit stationär zu erhalten. Inwieweit sie noch eine Funktion des Ortes sein kann, soll später durch direkte Messungen untersucht werden. (Abschnitt III, B, 1.)

C. Messung der Temperaturen und Widerstände der zu untersuchenden Metalle.

Nach diesen Erläuterungen über die Erreichung der notwendigen Temperaturen soll jetzt kurz nachgewiesen werden, wie sich diese bequem messen lassen. Dabei stütze ich mich auf die in grosser Zahl ausgeführten Untersuchungen von Callendar[1]), Benoit[2]), Holborn[3]), P. Chappuis und Harker[4]), Jäger und Disselhorst[5]), Siemens[6]) u. a. über die Widerstandsgrösse des Platins, als Funktion

[1]) Phil. Mag. (5), 47 und 48.
[2]) Comptes Rendus 76.
[3]) Drudes Ann. 6.
[4]) Trav. et Mem. du Bureau internat. 12.
[5]) Wiss. Abhandl. der phys. techn. Reichsanstalt 3.
[6]) Pogg. Ann. 110.

seiner Temperatur. Sie fanden alle, dass der Widerstand w_t bei der Temperatur t^0 sich darstellen lässt durch folgende Formel:

$$w_t = w_o(1 + a\,t - b\,t^2). \tag{1}$$

Hier bedeutet w_o den Widerstand des Drahtes bei der Temperatur $t = 0^0$, und a und b zwei konstante Materialkoeffizienten. (Für weitere Einzelheiten vergl. die erwähnte Literatur.)

Sind die drei Werte von w_o, a und b einmal genau bestimmt worden, so wird man jederzeit auf die Grösse der Temperatur, welcher der Draht ausgesetzt ist, schliessen können, wenn sein momentaner Widerstand gemessen wird.

Aus Gleichung (1) folgt nämlich:

$$t = \frac{1}{2b}\left[a - \sqrt{a^2 - 4b\left(\frac{w_t}{w_o} - 1\right)}\right]$$

oder, nach passender Umformung:

$$t = \frac{a}{2b} - \frac{1}{\sqrt{b \cdot w_o}} \cdot \sqrt{\left(\frac{a^2 \cdot w_o}{4b} + w_o\right) - w_t}. \tag{2}$$

Nun ist aber:

$$\left.\begin{aligned} w_o &= 2{,}567\,5\ \Omega \\ a &= 0{,}003\,914 \\ b &= 0{,}000\,000\,588 \end{aligned}\right\} \text{(Vergl. Abschnitt III, A.)}$$

Setzt man diese Werte in Gleichung (2) ein, so erhält man jetzt als endgültige Temperaturformel:

$$t = 3328{,}39 - 813{,}872 \cdot \sqrt{19{,}2921 - w_t} \tag{3}$$

Das allen meinen Temperaturmessungen zu Grunde gelegte Platinpyrometer stammte von der Cambridge Scientific Instrument Company. Seine Einrichtung war im wesentlichen dieselbe wie bei meinen Versuchsobjekten, nur mit dem Unterschied, dass hier das Porzellanrohr vier Zuleitungsdrähte aus Kupfer enthielt.

Die beiden Porzellanröhren von Pyrometer und Versuchsobjekt wurden jeweilen von verschiedenen Seiten bis in die Mitte des Heizrohres hineingeschoben, und nach Konstantwerden der Temperatur die beiden Widerstandsgrössen gemessen.

Die ganze Einrichtung beider Objekte war derart gewählt worden, dass sich die Widerstandsmessung mit Hülfe der Wheatstoneschen Drahtkombination ausführen liess. Dabei musste dasjenige Verfahren das günstigste sein, das in möglichst kurzer Zeit eine genaue Messung ermöglichte und ausserdem augenblicklich anzeigte, wenn aus irgend einem Grunde die sonst konstant erhaltene Temperatur sich veränderte.

Sei im Zweig $O_1\ O_5\ O_3$ einer Wheatstoneschen Drahtkombination (Fig. 3) eine elektromotorische Kraft E eingeschaltet und die in den einzelnen Leiterstücken auftretenden Stromstärken und Widerstände mit i_k und w_k bezeichnet, so lässt sich unter Berücksichtigung der beiden Kirchhoffschen Sätze über Stromverzweigung in geschlossenen Leitern bekanntlich nachweisen, dass die Stromstärke des Brückenstromes dargestellt ist durch die Gleichung:

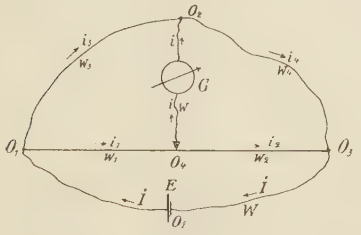


Fig. 3.

$$i = \frac{E}{N}(w_1\, w_4 - w_2\, w_3), \qquad (4)$$

worin N eine Summe von 16 positiven Gliedern bedeutet. Für $i = 0$ folgt hieraus:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{w_3}{w_4} \qquad (5)$$

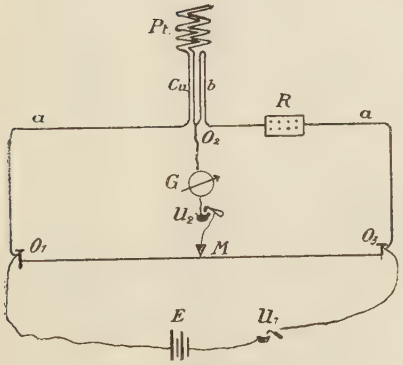


Fig. 4.

Bei meinen Messungen wurden die beiden Widerstände w_1 und w_2 durch einen horizontal ausgespannten Messdraht aus Nickelin dargestellt, w_3 durch das Pyrometer Pt und w_4 durch einen Rheostaten R (Fig. 4).

Als Stromquelle E benutzte ich Trockenelemente von Siemens und Halske.

Die Brücke wurde zwischen dem zweiten und dritten Kupferdraht des Pyrometers angelegt und nach einem Schleifkontakt M auf dem Messdraht geführt. Sie enthielt ausser einem Stromunterbrecher U_2 noch ein Siemens'sches Galvanometer G. Eine Erwärmung durch den Strom und daherige Vergrösserung des Platinwiderstandes während den Messungen wurde dadurch verhindert, dass Hauptstrom und Brückenstrom jeweilen nur für wenige Sekunden geschlossen wurden, d. h. nur so lange, bis der Ausschlag am Galvanometer abgelesen war. Der Brückenstrom ist immer nach dem Hauptstrom geschlossen worden, um schädliche Induktionsströme in der Brücke zu vermeiden.

Bei der Anlage meiner Drahtkombination sorgte ich mit peinlichster Genauigkeit dafür, dass die Zuleitungs- und Verbindungsdrähte a, a (Fig. 4) rechts und links von der Brücke von gleichem Widerstand waren. Wurde alsdann der Gleitkontakt M genau in

die Mitte des Messdrahtes gebracht, so konnte im Stöpselrheostat R soviel Widerstand eingeschaltet werden, dass beim Schliessen des Hauptstromes und der Brücke diese beinahe stromlos blieb.

Wird der zu bestimmende Platinwiderstand mit X und der Widerstand des Rheostaten mit R bezeichnet, so muss bei Stromlosigkeit der Brücke und dieser Anordnung nach Gleichung (5): $X = R$ sein, d. h. Die Grösse des gesuchten Widerstandes X kann direkt am Rheostaten abgelesen werden.

Da nun aber der verwendete Rheostat als kleinste Widerstandseinheit nur 0,1 Ohm enthielt, war es im allgemeinen auf diese Weise nicht möglich, den Brückenstrom ganz zum Verschwinden zu bringen. Das Galvanometer zeigte z. B. bei zwei um 0,1 Ohm sich unterscheidenden Rheostatenwiderständen zuerst einen negativen, dann einen positiven Ausschlag, woraus folgt, dass der genaue Widerstand zwischen diesen beiden Grenzen liegt. Nun ist aber bekanntlich die Stromstärke dem Ausschlag, und die kleine Widerstandsänderung der Stromstärke proportional, woraus folgt, dass das kleine Korrektionsglied, das zu dem am Rheostaten abgelesenen Widerstand addiert werden muss, direkt proportional mit dem Galvanometerausschlag ist, und aus je einem positiven und negativen berechnet werden kann.

Die Symmetrie der Brücke wurde vor jeder Messung durch zwei gleiche Widerstände kontrolliert.

Die Kontakte wurden mit Quecksilber hergestellt.

Alle die Vorteile, die ich über die Bestimmung des Pyrometerwiderstandes vermittelst der Wheatstone'schen Drahtkombination angegeben habe, lassen sich ohne weiteres übertragen auf die zu untersuchenden Metalle. Ich habe daher bei diesen Messungen im wesentlichen die gleiche Versuchsanordnung getroffen, wie sie in Fig. 4 zur Messung des Platinwiderstandes schematisch dargestellt ist. Einzig bei der Anlegung der Brücke in O_2 habe ich eine kleine Änderung vorgenommen, indem ich sie durch das Porzellanrohr hindurchführte und direkt mit dem, dem Rheostaten näher gelegenen Ende des Versuchsdrahtes verlötete (Draht C in Fig. 2), um mir so eine vierte Leitung zu ersparen.

Bei Stromlosigkeit der Brücke gilt dann natürlich auch hier die Gleichung: $X = R$.

In Fig. 5 ist ausser einem Längsschnitt α—β durch den Glühofen die ganze Versuchsanlage schematisch dargestellt, wie sie bei den Messungen höherer als Zimmertemperaturen verwendet worden ist. Die linke Hälfte diente zur Bestimmung des Platinwiderstandes, also der Temperatur, während rechts die zu bestimmenden Widerstände der Versuchsobjekte selbst gemessen wurden.

$\alpha-\beta$ Schnitt durch den Ofen.
$A.\ B.$ Akkum. Batterie des Heizstroms.
A Ampèremeter.
H Heizrohr.
$R.\ W.$ Regulierwiderstand.
$S.\ U.$ Stromunterbrecher (Heizstrom).
$Pt.$ Platinwiderstand (Temp. Messungen).
$V.\ O.$ Versuchsobjekt.
M_1, M_2 Messdrähte.
S_1, S_2 Schleifkontakte.
R_1, R_2 Rheostate.
G_1, G_2 Galvanometer.
E_1, E_2 Elektromotor. Kräfte.
U_1, U_2 Unterbrecher (Hauptströme).
u_1, u_2 Unterbrecher (Brückenströme).

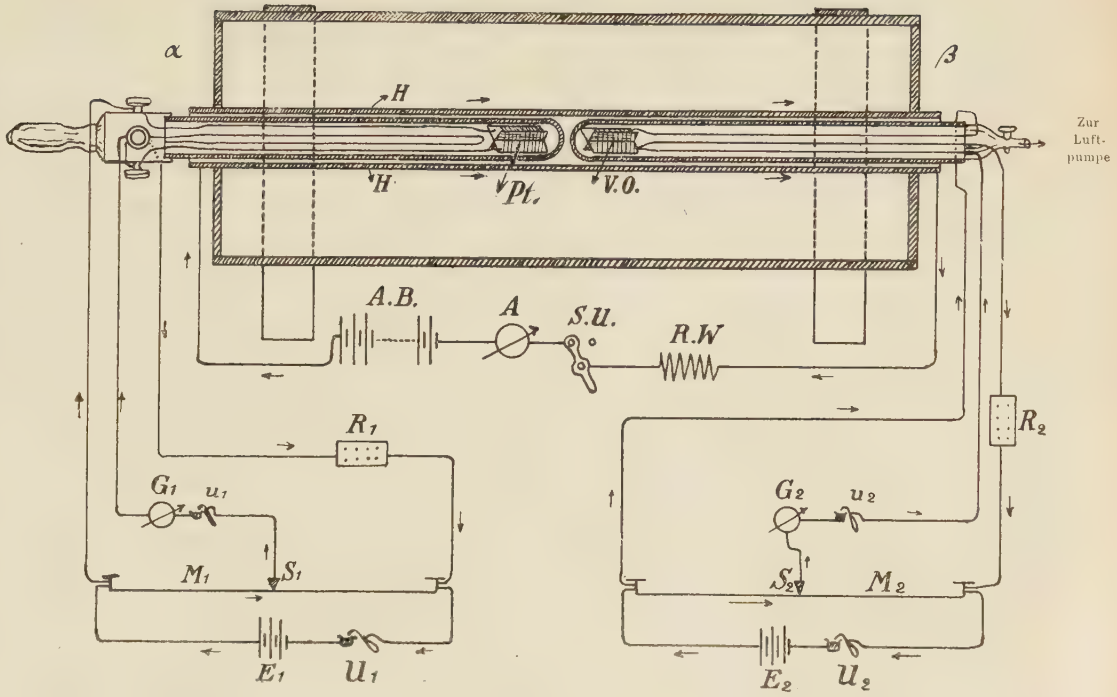


Fig. 5.

III. Praktische Ausführung.

A. Aichung des Pyrometers.

Um einen beliebigen Platindraht als Thermometer benutzen zu können, ist die Kenntnis der in den Gleichungen (1) u. f. mit w_o, a und b bezeichneten Grössen unerlässlich. Es handelte sich daher in erster Linie darum, diese Grössen möglichst genau zu bestimmen.

w_o konnte leicht direkt gemessen werden, indem das den Platindraht umhüllende Porzellanrohr in schmelzendes Eis gestellt und mit den Ablesungen zugewartet wurde, bis der ganze Draht die Temperatur $t = 0^0$ angenommen hatte.

Die durch die Brücke fliessenden Ströme wurden mit einem Wiedemannschen Spiegel - Galvanometer gemessen. Die Distanz ($D = 1570$ mm) zwischen Spiegel und Skala war so gross, dass $tg\varphi = c \cdot s$ angenommen werden durfte, wenn s die Zahl der abgelesenen Skalenteile und c eine Konstante bedeuten. Infolgedessen ist die Stromstärke direkt proportional mit s.

Angenommen man habe bei konstanter Temperatur und einem Rheostatenwiderstand von $\frac{n}{10}$ Ohm einen negativen Ausschlag von s_1 Skalenteilen, bei $\frac{n+1}{10}$ Ohm einen positiven von s_2 Skalenteilen erhalten, so wird nach den Erwägungen im vorigen Abschnitt die Proportion erfüllt sein: $s_1 : (s_1 + s_2) = \Delta : 0{,}1$, wobei Δ die kleine Widerstandsgrösse bedeutet, die zur Angabe $\frac{n}{10}$ des Rheostaten addiert werden muss, um den genauen Wert des Platinwiderstandes zu erhalten. Aus dieser Proportion folgt:

$$\Delta = \frac{s_1}{10\,(s_1 + s_2)} \tag{6}$$

Also beträgt jetzt der ganze gesuchte Widerstand:

$$w = \frac{1}{10}\left(n + \frac{s_1}{s_1 + s_2}\right) \text{Ohm}. \tag{7}$$

Die Empfindlichkeit des Galvanometers wurde so reguliert, dass man im Durchschnitt für je $\frac{1}{10}$ Ohm Widerstandsänderung ca. 100 mm Ausschlag erhielt. Die Ablesungen liessen sich aber mit grosser Sicherheit bis auf $\frac{1}{10}$ mm genau machen, so dass kleine Änderungen des Widerstandes von $\frac{1}{10000}$ Ohm, oder 0,05‰ der normalen Grösse ($w_o = 2{,}5\ \Omega$ ca.) noch nachgewiesen werden konnten.

Nachdem das Porzellanrohr zirka eine Stunde in schmelzendem Eis gestanden hatte und eine systematische Änderung der Ausschläge nicht mehr konstatiert werden konnte, wurde mit den Messungen, die zur Sicherheit mehrmals wiederholt wurden, begonnen. Ohne einen Kontakt zu ändern, befreite ich sodann das Pyrometer vom Eise, erwärmte es langsam und brachte es in die Dämpfe siedenden Wassers. Nach Konstantwerden dieser Temperatur wurde wieder gemessen, alsdann wieder auf 0° abgekühlt usw., bis genügendes Beobachtungsmaterial vorlag.

Daraus wurden dann, unter Zuhülfenahme der Methode der kleinsten Quadrate, folgende Werte bestimmt:

$$t = 0^\circ: \qquad w = 2{,}5675\ \Omega$$
$$t = 98^\circ{,}85: \quad w = 3{,}5465.$$

Zur Bestimmung des ersten Temperaturkoeffizienten a hat man jetzt nach Gleichung (1):

$$w_t = w_0 (1 + a\,t - b\,t^2).$$

Für die Grösse b, zu deren experimentellen Bestimmung mir die Mittel nicht zur Verfügung standen, gab die Fabrik, in welcher das Pyrometer hergestellt und geprüft worden ist, folgenden Wert an:

$$b = 0{,}000\,000\,588.$$

Setzt man nun alle bekannten Zahlenwerte in die Gleichung (1) ein, so erhält man daraus:

$$a = 0{,}003\,914.$$

Für die gleichen Grössen a und b des Platins haben gemessen:

Benoit[1]: $a = 0{,}002\,454$, $b = 0{,}000\,000\,594$ } für $t = 0^\circ$ bis 860°

Holborn[2]: $a = 0{,}003\,934$, $b = 0{,}000\,000\,988$ } für $t = -189^\circ$ bis 0° und
$a = 0{,}003\,945$, $b = 0{,}000\,000\,584$ } für $t = 0^\circ$ bis 500°

Chappuis u. Harker[3]: $a = 0{,}003\,922$, $b = 0{,}000\,000\,585$ } für $t = 0^\circ$ bis 500°

Jaeger und Disselhorst[4]:
$a = 0{,}003\,840$ für $t = 18^\circ$ bis 100°.

---

[1]) Comptes Rendus 76.
[2]) Wiedemann Annalen 6.
[3]) Trav. et Mem. du Bureau int. 12.
[4]) Wiss. Abh. der Phys. techn. Reichsanstalt 3.

B. Widerstandsmessungen an Eisendrähten.

1. Allgemeine Bemerkungen.

Als eine der Hauptbedingungen für genaue Messungen musste gefordert werden, dass die Temperatur im Innern des Heizrohres stationär, d. h. für längere Zeit konstant erhalten werden konnte. Diese Forderung war leicht dadurch erreichbar, dass ich den Heizstrom auf konstantem Wert erhielt und zwei bis drei Stunden zuwartete, bevor ich jeweilen mit den Messungen begann.

Bedenkt man, dass im Innern des Heizrohres, dessen Enden in die Luft der Zimmertemperatur von 15° bis 20° ragten, Maximaltemperaturen von über 1000° herrschten, so ergibt sich von selbst, dass nicht in jedem Querschnitt des Rohres (auch bei stationärem Zustand) die gleiche Temperatur existieren konnte.

Da ferner mein Temperaturmesser (Glimmerkreuz mit Platindraht) eine Längenausdehnung von 6 cm hatte, erhielt ich offenbar bei Verwendung seiner gemessenen Widerstandsgrösse aus der Rechnung eine Mitteltemperatur des Raumes, über welchen der Platindraht sich erstreckte. Ebenso wird die gleichzeitig gemessene Widerstandsgrösse des zu untersuchenden Metalles einer gewissen Mitteltemperatur entsprechen. Da nun der Ofen in bezug auf seinen mittleren Querschnitt genau symmetrisch gebaut ist, müssen, bei horizontaler Lage, die Temperaturen in Querschnitten mit gleichen Abständen vom mittleren ebenfalls gleich sein.

Bringt man nun auch Pyrometer und Versuchsobjekt genau koaxial mit dem Heizrohr und symmetrisch zu dessen mittlerem Querschnitt zur Aufstellung, so muss notwendigerweise die vom Pyrometer angegebene, mittlere Temperatur auch diejenige des Versuchsobjektes sein.

Um übrigens die Grösse des eventuell entstehenden Fehlers nachweisen zu können, insofern Pyrometer oder Versuchsobjekt etwas aus ihrer symmetrischen Lage verschoben würden, habe ich besondere Messungen vorgenommen. Zuerst wurde das Pyrometer bis genau zur Mitte des Heizrohres vorgeschoben, und, wie auch bei allen folgenden Versuchen, an den Enden die Zwischenräume zwischen Heizrohr und Pyrometer durch Asbestschnüre gut ausgestopft, um Luftströmungen in jenem möglichst abzuhalten. Bei stationärem Zustand wurde hierauf der Widerstand gemessen. Dann zog ich das Pyrometer um 3 cm heraus, wartete zu, bis der Widerstand wieder konstant geworden war und mass ihn abermals. Darauf brachte ich das Instrument wieder in seine normale Lage und mass von neuem. Der Mittelwert dieser ersten und dritten Messung lieferte eine

Temperatur von $t = 939^0,9$ und die zweite Messung eine solche von $t = 935^0,0$ C, also immerhin eine Temperaturdifferenz von $4^0,9$ oder 0,5 %. Bei der grossen Sorgfalt, die jeweilen für die richtige Plazierung der beiden Objekte beobachtet wurde, ist nicht anzunehmen, dass durch den Temperaturabfall im Innern des Rohres merkliche Fehler entstehen konnten.

Dass übrigens auch bei zeitlich variabeln Temperaturen kein Unterschied besteht zwischen den Mitteltemperaturen des Pyrometers und des Versuchsobjektes, hat sich leicht durch folgende, einfache Versuche ergeben, die ich nacheinander bei tiefern, mittleren und höhern Temperaturen ausgeführt habe: Pyrometer und Versuchskörper wurden so lange in ihrer normalen Lage bei konstanter Heizstromstärke erwärmt, bis ihre Widerstände keine Änderungen mehr zeigten. Dann wurde die Stromstärke um einen nur kleinen Betrag geändert und die beiden Galvanometer gleichzeitig beobachtet. Schon nach wenigen Sekunden konnte eine Vergrösserung oder Verkleinerung der Ausschläge bemerkt werden, die alsdann sehr rasch wuchs, aber in beiden Galvanometern immer gleichzeitig erschien.

Während die Empfindlichkeit des Wiedemann-Galvanometers im Pyrometerkreis wegen des nur langsam wachsenden Platinwiderstandes auch bis zu den höchsten Temperaturen ausreichte, wurden die Ausschläge des Galvanometers von Hartmann und Braun bei zunehmendem Widerstand sehr bald so klein, dass eine zuverlässige Messung auch bei vergrösserter E. M. K. unmöglich wurde. Diesem Übelstand konnte ich dadurch abhelfen, dass ich durch die magnetische Astasierung die ursprüngliche Empfindlichkeit wieder herstellte.

2. Eisendraht Nr. 1.

Nachdem eine ganze Reihe von Versuchen mit dünnen Eisendrähtchen, die ich in eine mit Stickstoff angefüllte Glasröhre einschmelzen liess, wegen der zu frühen Erweichung des Glases, nicht zum gewünschten Ziel führten, liess ich meine Versuchsobjekte so umändern, wie sie in Abschnitt II A näher beschrieben sind (vergl. Fig. 2).

Für die ersten Experimente hatte ich einen Eisendraht von 1 m Länge und 0,10 mm Dicke auf das Glimmerkreuz gewickelt (Fig. 1), dieses ins Porzellanrohr eingeschlossen und evakuiert. Alsdann wurde der Eisenwiderstand mehrmals bei den Temperaturen des schmelzenden Eises und des siedenden Wassers genau gemessen, wobei sich folgende Werte ergaben:

Für $t = 0^0$ war $w = 16{,}349\ \Omega$
„ $t = 98^0,49$ „ $w = 23{,}512$
„ $t = 21^0,0$ (Zimmertemp.) war $w = 17{,}521\ \Omega$.

H. Chevalier[1]) hat im Jahre 1900 an Hand von mannigfachen Experimenten nachgewiesen, dass der elektrische Widerstand eines Metalles bei periodischem Erwärmen und Wiederabkühlen stetigen Veränderungen unterworfen ist. Er hat gezeigt, dass diese Veränderungen indessen schon nach einer gewissen Anzahl von Perioden derart klein werden, dass sich die Widerstandsgrösse praktisch schon bald einem festen Wert nähert. Ich stellte mir die Aufgabe, diese Eigenschaft auch an meinem Versuchskörper zu prüfen, und ich habe deshalb den Draht vorsichtig erwärmt bis zur Temperatur $t = 275^0$, wobei $w = 36{,}6\ \Omega$ war.

Nach sorgfältiger Abkühlung erhielt ich bei $t = 20^0$: $w = 17{,}37\ \Omega$. Dann erwärmte ich wieder und hielt den Widerstand während 3 ½ Stunden auf ca. 750° C, nach welcher Zeit sich ergab:

$$t = 752^0 \qquad w = 112{,}4\ \Omega.$$

Nach Abkühlung auf Zimmertemperatur mass ich am folgenden Tag:

$$t = 19^0{,}5 \qquad w = 16{,}46\ \Omega.$$

Bei nochmaligem Erwärmen und Konstanthalten während 1 ½ Stunden auf der Temperatur von 758° war $w = 116{,}9\ \Omega$ geworden. Die nächste Abkühlung ergab: $t = 19^0{,}8$, $w = 16{,}50\ \Omega$. Wieder erwärmte ich langsam und hielt die Temperatur eine Stunde auf $t = 755^0$, wobei $w = 117{,}2\ \Omega$ erreichte, und nach erneuter Abkühlung war $t = 20^0{,}5$ und $w = 16{,}615\ \Omega$ geworden. Als nach diesem dreimaligen Erhitzen auf 750° bis 760° und nachfolgendem Abkühlen auf Zimmertemperatur nur noch so kleine Änderungen von w zu konstatieren waren, ging ich zu genauen Messungen über, indem ich diese in kleinern Temperaturintervallen (von 30° bis 50°) aufeinander folgen liess. Ich verzichte hier auf die Wiedergabe sämtlicher Resultate, da sie, wie sich bald herausstellen wird, doch nicht ganz frei von störenden Einflüssen sind. Einige Punkte seien immerhin angeführt.

Ich habe gemessen:

$t =$	0°	199°,0	392°,0	604°,4	745°,4
$w =$	16,348 Ω	30,034 Ω	52,537 Ω	86,415 Ω	119,149 Ω.

Vier Wochen später habe ich am gleichen Widerstand die Mes-

[1]) Comptes Rendus 130 et 133.

sungen zum Teil wiederholt, und ausserdem bei der Temperatur der festen Kohlensäure mehrmals beobachtet.

Die Hauptresultate dieser Wiederholungsreihe sind folgende:

$t =$	$-78^0,56$	0^0	$196^0,2$	$373^0,6$	$566^0,3$	$778^0,8$
$w =$	$10,045\ \Omega$	$15,471\ \Omega$	$30,924\ \Omega$	$51,507\ \Omega$	$82,188\ \Omega$	$142,258\ \Omega$.

Nachdem wieder langsam abgekühlt worden war hat sich gezeigt, dass der Eisenwiderstand nicht unerheblich grösser geworden war. Bei $t = -78^0,78$ war nämlich $w_{Fe} = 11,138\ \Omega$, bei $t = 0^0$: $w_{Fe} = 16,720\ \Omega$ und bei $t = 98^0,70$: $w_{Fe} = 25,335\ \Omega$. Ich glaubte daraus schliessen zu müssen, dass der von H. Chevalier bezeichnete Zustand des Eisens (vergl. p. 16) noch nicht erreicht war. Ich habe daher den Draht noch viermal bis gegen 800° C erhitzt und jeweilen wieder sorgfältig abgekühlt. Bei den drei ersten Erhitzungen wurde die höchste Temperatur jedesmal $1^1/_2$ Stunden, bei der letzten 6 Stunden lang konstant erhalten. Dabei wurden folgende Grössen gemessen:

$t =$	$20^0,7$	$w_{Fe} = 17,952\ \Omega$;	$t =$	$790^0,8$	$w_{Fe} = 153,0\ \Omega$
	19,1	18,987		781,9	152,5
	17,5	19,110		791,4	163,4
	18,2	19,805		783,0	176,3
	18,0	130,3			

Die ausserordentlich starke Vergrösserung des Widerstandes von $19,8\ \Omega$ auf $130,3\ \Omega$ bei Zimmertemperatur weckte in mir die Vermutung, dass der Draht irgendwo eine Beschädigung erlitten habe. Beim Öffnen des Porzellanrohres zeigte sich, dass die Oberfläche des Drahtes ganz „verkohlt", und der beim Einsetzen geschmeidige Draht sehr brüchig geworden war. Ohne Zweifel war der Glasansatz nicht luftdicht genug ins Porzellanrohr eingekittet gewesen, so dass bei den hohen Temperaturen der Draht sich leicht oxydieren konnte, wobei sich natürlich der Querschnitt verkleinerte und dementsprechend der Widerstand grösser werden musste. Aus diesen Messungen durfte ich daher noch keine bestimmten Schlüsse über den Zusammenhang von Temperatur und Widerstand ziehen.

3. Eisendraht Nr. 2.

Nach dem vorigen Beispiel habe ich sofort einen zweiten Eisendraht von gleichen Dimensionen gewickelt und ihn sorgfältig ins Porzellanrohr einsetzen lassen. Nach erfolgter Evakuierung stellte ich einige Vorversuche an, indem ich ihn mehrere Male auf hohe Temperaturen brachte, wieder abkühlte usw., um vor Beginn der

genauen Messungen einen stationären Zustand zu erhalten. Welche Veränderungen dabei vorgekommen sind ergibt sich aus folgender Zusammenstellung:

1)	$t = 17°,8$:	$w = 17{,}264\ \Omega$;	2)	$t = 763°,6$:	$w = 111{,}9\ \Omega$
3)	17,5	15,300	4)	760,4	112,8
5)	18,6	14,841	6)	761,6	111,6
7)	20,0	14,633	8)	760,6	111,5
9)	19,4	14,425	10)	659,6	90,7

Aus diesen Angaben geht hervor, dass die wiederholte Erwärmung den Widerstand bei Zimmertemperatur um ca. 17 % seines ursprünglichen Wertes verkleinert hat, dass aber trotzdem bei jedem neuen Anstieg auf die Maximaltemperatur der Widerstand dort keine Änderung dargetan hat.

Aus der hier anschliessenden, genauen Beobachtungsreihe gebe ich wieder nur einige Punkte an. Es wurde gemessen:

$t =$	$-78°,64$	$0°$	$214°,1$	$412°,1$	$608°,3$	$760°,3$
$w =$	$8{,}181\ \Omega$	$12{,}982\ \Omega$	$28{,}562\ \Omega$	$50{,}332\ \Omega$	$80{,}782\ \Omega$	$111{,}457\ \Omega$

Nach Vollendung dieser Versuchsreihe trachtete ich noch höhere Temperaturen zu erreichen, was mir z. T. auch gelungen ist. Dabei konnte ich folgende Grössen messen:

$t =$	$760°,6$	$781°,6$	$806°,6$	$824°,3$
$w =$	$112{,}38\ \Omega$	$117{,}94\ \Omega$	$124{,}97\ \Omega$	$130{,}94\ \Omega$.

Nachdem der Draht während $3\,^1/_2$ Stunden dieser letzten Temperatur ausgesetzt gewesen war, wurde langsam abgekühlt und hierauf bei Zimmertemperatur gemessen: $w = 370\ \Omega$.

Die Vermutung, dass auch dieser Draht gerissen sei, bestätigte sich beim Öffnen des Rohres. Auch war die vor dem Versuch noch blanke Drahtoberfläche wieder stark oxydiert.

4. Eisendraht Nr. 3.

Die bisherigen Versuche zur genauen Ermittelung des elektrischen Widerstandes von Eisendrähten bei hohen Temperaturen sind alle gescheitert an der leichten Oxydierbarkeit des Materials. Um ans Ziel zu gelangen, musste ich unter allen Umständen dafür sorgen, dass der Raum, in welchem der Draht eingeschlossen war, beliebig lange Zeit möglichst luftleer erhalten werden konnte. Das suchte ich dadurch zu erreichen, dass ich die Quecksilberluftpumpe so in die Nähe des Glühofens brachte, dass ich sie direkt mit dem Ansatz-

rohr meines Versuchsobjektes vermittelst eines Schlauches verbinden konnte. Alle Übergänge von Glas zu Gummi wurden überdies mit einem, an der Luft erstarrenden Gemisch von Kolophonium und Wachs übergossen. Nun war mir die Möglichkeit gegeben, in jedem beliebigen Augenblick, auch wenn der Draht auf den höchsten Temperaturen war, zu evakuieren und an dem mit der Luftpumpe verbundenen Manometer den Druck der noch vorhandenen Luft abzulesen, der übrigens sehr leicht bis auf ein bis zwei Millimeter (Quecksilber) reduziert werden konnte.

Nach diesen kleinen äussern Abänderungen schritt ich zu den üblichen Vorversuchen der periodischen Erwärmung und Wiederabkühlung, wobei folgende Grössen gemessen worden sind:

1)	$t = 20°,2$:	$w = 16{,}260\ \Omega$;	2)	$t = 783°,5$:	$w = 115{,}30\ \Omega$
3)	20,1	15,467	4)	781,7	118,94
5)	20,6	15,624	6)	784,9	121,20
7)	20,3	15,580.			

Der Rückgang des Widerstandes bei Zimmertemperatur war nach der ersten Erwärmung $1\,^1/_4\,\%$, nach der letzten total $2\,\%$ des ursprünglichen Wertes.

Als kleinen Auszug aus einer hier anschliessenden, genauen Versuchsreihe gebe ich folgende Zahlen:

$t =$	$-78°,67$	$0°$	$198°,6$	$400°,6$	$598°,5$	$799°,0$	$908°,3$
$w =$	$9{,}100\ \Omega$	$14{,}214\ \Omega$	$29{,}220\ \Omega$	$51{,}482\ \Omega$	$83{,}467\ \Omega$	$129{,}56\ \Omega$	$159{,}20\ \Omega$.

Nach der höchsten Temperatur wurde langsam abgekühlt. Infolge der Zusammenziehung des Drahtes bei den tiefen Temperaturen müssen Spannungen aufgetreten sein, die den Draht zu zerreissen vermochten. Immerhin hat sich beim Öffnen des Porzellanrohres gezeigt, dass zum erstenmal seit meinen Versuchen mit Eisen die Drahtoberfläche, trotz der vorher erreichten hohen Temperatur von 908°, schön blank geblieben war wie vor dem Versuch.

Dieser kleine Erfolg der verbesserten Evakuierungsmethode bewog mich, das gleiche Experiment an einem weitern Eisendraht Nr. 4 zu versuchen.

5. Eisendraht Nr. 4.

Indem ich mich bemühte, an diesem 4. Objekt alle die mit den 3 ersten Drähten gesammelten Erfahrungen praktisch zu verwerten, gelang es mir, in jeder Beziehung befriedigende Resultate zu erzielen. Um ein nochmaliges Zerreissen beim Abkühlen zu verhindern, achtete ich sorgfältig darauf, diesmal den Draht möglichst locker auf das

Glimmerkreuz zu wickeln, doch immerhin so, dass ein gegenseitiges Berühren der benachbarten Windungen ausgeschlossen war.

Der hier zur Verwendung gekommene Eisendraht hatte eine totale Länge von 100 cm und eine Dicke von $^1/_{10}$ mm und besass blanke Oberfläche.

Messungen wurden hier ausgeführt bei den Temperaturen, der flüssigen Luft, der festen Kohlensäure, des schmelzenden Eises und, wie bis anhin, denjenigen des Glühofens.

Zuerst bestimmte ich den Widerstand in schmelzendem Eis und fester Kohlensäure und fand dabei:

$$t = 0^0: \qquad w_{Fe} = 14{,}898 \; \Omega$$
$$t = -78^0{,}58: \quad w_{Fe} = 10{,}444.$$

Dann wurde das Porzellanrohr in ein ca. 30 cm tiefes, doppelwandiges, mit flüssiger Luft angefülltes Glasrohr hineingestellt und die ganze Kombination nach aussen so gut wie möglich thermisch isoliert. Schon nach wenigen Minuten zeigten sich nur noch geringe Widerstandsänderungen.

Nachdem bei vollständig stationärem Zustand die Messungen vorgenommen worden waren (vergl. Tab. 1), wurden zum Vergleich auch noch einige Punkte bei den Temperaturen der festen Kohlensäure und des schmelzenden Eises aufgenommen. Alsdann brachte ich meinen Apparat ins Heizrohr, um dort mit meinen Messungen bei höhern Temperaturen fortzufahren. Die diesbezüglichen Resultate sind alle in Tabelle 1 verzeichnet.

In dieser, wie auch in allen folgenden Tabellen gelten nachstehende Bezeichnungen:

I = Heizstromstärke (Akkumulatorenstrom),
R = eingeschaltete Widerstände der Rheostaten,
s = Skalenteile (Galvanometerausschläge),
$Korr.$ = Korrektion des Widerstandes, berechnet aus je einem positiven und negativen Galvanometerausschlag,
w = Widerstand,
t = Temperatur.

Die Maximaltemperatur von 1009°,6 wurde bei dieser Versuchsreihe nach zwei einzigen Unterbrechungen erreicht, die nach den Temperaturen von 199°,4 und 451°,2 stattfanden. Nach den beiden Erkaltungen wurde gemessen:

$$w_{Fe} = 15{,}950 \; \Omega \text{ bei } t = 18^0{,}4$$
$$\text{und } w_{Fe} = 15{,}138 \text{ bei } t = 19{,}0.$$

Tabelle 1.

I	Platin				Eisen				t
	R	s	*Korr.*	w	R	s	*Korr.*	w	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	° C
					5,2	— 188,9			
							0,0872	5,2872	—191,0
					5,3	+ 27,7			
					10,4	— 40,7			
							0,0314	10,4314	— 78,58
					10,5	+ 88,7			
					14,9	+ 0,0			
							0,0000	14,900	0
					15,0	+ 80,7			
	3,0	— 2,8			17,4	— 10,2			
2,67			0,0039	3,0039			0,011	17,389	+ 43,7
	3,1	+ 68,5			17,5	— 100,2			
	3,5	— 47,0			21,0	— 59,2			
4,75			0,0649	3,5649			0,088	21,088	+100,8
	3,6	+ 16,9			21,1	+ 7,9			
	4,0	— 22,0			24,4	— 44,1			
5,88			0,0381	4,0381			0,084	24,484	+149,7
	4,1	+ 35,7			24,5	+ 8,3			
	4,5	— 5,8			28,4	— 5,9			
6,70			0,0110	4,5110			0,014	28,414	+199,4
	4,6	+ 47,2			28,5	+ 36,2			
	5,0	— 3,9			32,8	— 22,2			
7,70			0,0070	5,0070			0,042	32,842	+252,3
	5,1	+ 88,1			32,9	+ 30,4			
	5,4	— 65,4			37,5	— 43,8			
8,30			0,0766	5,4766			0,070	37,570	303,3
	5,5	+ 20,0			37,6	+ 18,5			
	5,8	— 79,0			42,2	— 4,2			
9,10			0,0961	5,8961			0,008	42,208	349,6
	5,9	+ 3,2			42,3	+ 45,3			
	6,3	— 33,5			47,7	— 42,0			
9,78			0,0477	6,3477			0,052	47,752	400,3
	6,4	+ 36,7			47,8	+ 38,0			
	6,7	— 60,7			53,4	— 14,6			
10,30			0,0946	6,7946			0,027	53,427	451,2
	6,8	+ 3,4			53,5	+ 40,0			
	7,1	— 82,0			59,4	— 49,8			
11,20			0,0945	7,1945			0,007	59,507	497,6
	7,2	+ 3,8			59,5	— 3,2			
	7,6	— 21,3			67,0	— 11,8			
11,68			0,0276	7,6276			0,032	67,032	548,8
	7,7	+ 55,8			67,1	+ 25,6			

Tabelle 1 (Fortsetzung).

I	Platin				Eisen				t
	R	s	*Korr.*	w	R	s	*Korr.*	w	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	°C
	8,0	− 8,4			74,1	− 6,8			
12,40			0,0122	8,0122			0,024	74,124	595,0
	8,1	+ 60,4			74,2	+ 21,2			
	8,4	− 43,0			83,0	− 7,9			
13,30			0,0978	8,4978			0,035	83,035	654,4
	8,5	+ 21,0			83,1	+ 14,8			
	8,8	− 58,8			92,4	+ 0,0			
14,12			0,0960	8,8960			0,000	92,400	704,2
	8,9	+ 2,5			92,5	+ 22,8			
	9,2	− 19,0			100,8	− 2,2			
14,80			0,0322	9,2322			0,013	100,813	747,0
	9,3	+ 40,0			100,9	+ 15,2			
	9,6	− 16,5			111,8	+ 2,0			
15,53			0,0286	9,6282			− 0,014	111,786	798,4
	9,7	+ 41,1			111,9	+ 16,2			
	9,8	− 45,0			116,5	− 3,0			
15,80			0,0776	9,8776			0,021	116,521	831,2
	9,9	+ 13,0			116,6	+ 11,3			
	10,0	− 11,7			118,5	− 9,2			
16,10			0,0227	10,0227			0,075	118,575	850,5
	10,1	+ 39,9			118,6	+ 3,0			
	10,1	− 38,1			120,3	− 4,1			
16,40			0,0704	10,1704			0,029	120,329	870,3
	10,2	+ 17,0			120,4	+ 10,0			
	10,3	− 29,3			122,2	+ 1,2			
16,90			0,0562	10,3562			− 0,010	122,190	895,5
	10,4	+ 22,8			122,3	+ 12,8			
	10,5	− 49,6			123,7	− 6,1			
17,42			0,0941	10,5941			0,047	123,747	928,1
	10,6	+ 3,1			123,8	+ 7,0			
	10,8	− 9,0			124,1	− 9,8			
18,80			0,0174	10,8174			0,081	124,181	959,1
	10,9	+ 42,9			124,2	+ 2,3			
	11,1	− 36,0			126,0	− 15,8			
18,85			0,0745	11,1745			0,076	126,176	1009,6
	11,2	+ 12,4			126,1	− 6,8			

Nach langsamer Abkühlung nach der höchsten Temperatur von 1009°,6 wurde gemessen: $w_{Fe} = 12{,}300\ \Omega$ bei $t = 24°{,}5$. Bei der Temperatur des schmelzenden Eises ergab sich sodann:

$$t = 0°: \ w_{Fe} = 10{,}871\ \Omega,$$

also eine Abnahme des Widerstandes um 4,029 Ω oder 27 % gegenüber der 1. Messung vor der Erhitzung.

Um das weitere Verhalten dieses Eisendrahtes zu prüfen, habe ich ihn noch einigemale periodisch erwärmt und abgekühlt und dabei folgende Grössen gemessen:

1)	$t = 0°$:	$w_{Fe} = 10{,}871\ \Omega$;	2)	$t = 941°{,}0$:	$w = 122{,}2\ \Omega$
3)	28,4	11,430	4)	927,1	123,1
5)	0	10,281	6)	749,3	97,98
7)	18,4	11,271	8)	1013,8	126,22
9)	20,4	11,260.			

Die letzten Werte zeigen, dass bei weiterem periodischem Erwärmen und Abkühlen nur noch ganz unbedeutende Veränderungen zu erwarten wären.

Um den Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand bei dem nun von bleibenden Widerstandsänderungen befreiten Eisendraht auch noch kennen zu lernen, stellte ich weitere, den bisherigen analoge Beobachtungen an. Von den dabei gewonnenen Resultaten gebe ich in Tabelle 2 nur noch die Werte für die Temperaturen und ihre entsprechenden Widerstände (vergl. die Kolonnen 5, 9 und 10 der Tabelle 1).

Um zu zeigen, dass nach dieser letzten Versuchsreihe (Tab. 2) der Eisenwiderstand bei gleichen Temperaturen von jetzt an tatsächlich keine bleibenden Veränderungen mehr erleidet, habe ich noch eine weitere Wiederholung der bisherigen Messungen vorgenommen, diesmal aber in grössern Temperaturintervallen, und die Ergebnisse in Tabelle 3 zusammengestellt.

Nach vollständigem Erkalten ergab sich sodann bei Zimmertemperatur:

$$t = 19°{,}5: \ w_{Fe} = 11{,}278\ \Omega$$

und beim Gefrierpunkt des Wassers:

$$t = 0°: \ w_{Fe} = 10{,}263\ \Omega.$$

Vergleicht man die Tabelle 1 mit den Tabellen 2 und 3, so bekommt man ein anschauliches Bild vom Verlauf des Widerstandes bei der ersten Erwärmung und nach mehrfacher Wiederholung, besonders wenn man auf Koordinatenpapier die Temperaturen als

Tabelle 2.

w_{Pt}	w_{Fe}	t
Ω	Ω	°C
—	5,986	— 78,52
—	10,193	0,0
3,1104	13,319	+ 54,5
3,4964	15,755	93,8
4,0482	19,584	150,7
4,5523	23,613	203,7
4,9782	27,377	249,2
5,4409	32,292	299,4
5,8638	37,417	346,0
6,3447	43,430	400,0
6,8637	50,922	459,2
7,2118	56,483	499,6
7,6414	64,087	550,4
8,0261	71,533	596,7
8,4779	80,715	652,0
8,8663	89,874	700,6
9,2749	100,23	752,5
9,6618	111,90	802,8
9,9142	117,55	836,1
10,4420	124,11	907,2
11,1632	127,55	1008,0

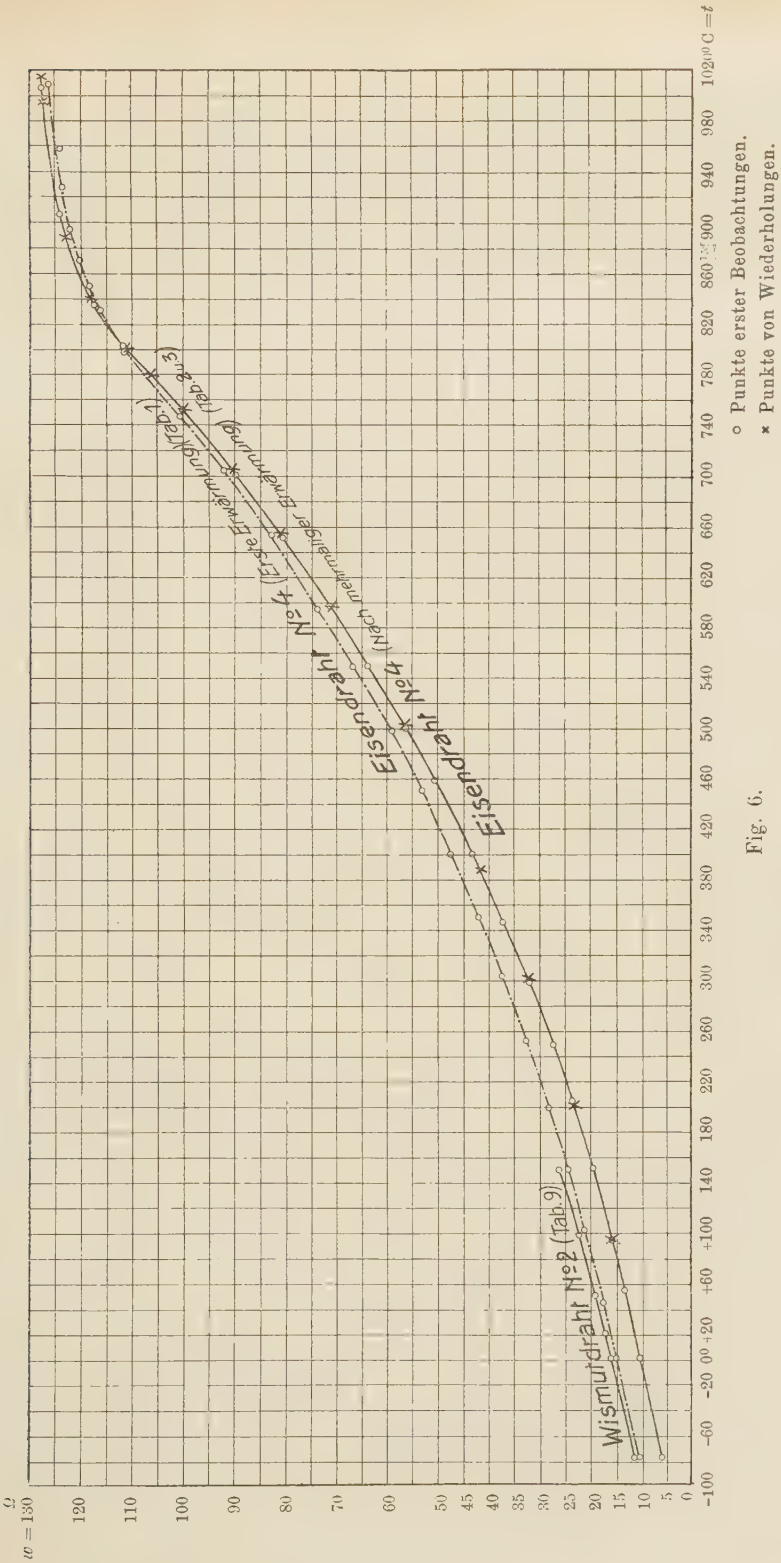
Tabelle 3.

w_{Pt}	w_{Fe}	t
Ω	Ω	°C
3,5116	15,685	95,4
4,5242	23,178	200,7
5,4587	32,251	301,2
6,2384	41,651	387,9
7,2346	56,420	502,3
8,0291	70,964	597,0
8,4990	81,132	654,7
8,9079	90,587	705,8
9,2784	100,224	753,0
9,4908	106,48	780,4
9,6490	111,18	801,1
9,9511	118,37	841,0
10,3103	123,02	889,2
11,0805	127,34	996,2
11,2180	127,73	1015,7

Abszissen und die entsprechenden Widerstände als Ordinaten aufträgt und die so erhaltenen Punkte untereinander verbindet (vergl. Fig. 6).

Durch diese letzten Messungen ist endgültig festgestellt, dass durch mehrmalige Erhitzung und Wiederabkühlung unter Luftabschluss der elektrische Widerstand eines Eisendrahtes sich ganz bedeutend verkleinert, hier z. B. bei $t = 0^0$ um 31 % des ursprünglichen Wertes, dass aber diese Reduktion mit steigender Temperatur stetig abnimmt und bei ca. 820° verschwindet. Für noch höhere Temperaturen weist der mehrfach erhitzte Eisendraht einen grössern Widerstand auf als der zum erstenmal auf diese Temperaturen gebrachte, gleiche Eisendraht. Doch beträgt diese Vergrösserung bei 1000° nur 1 % des ersten Wertes.

Diese grossen Veränderungen, namentlich die bleibenden bei tiefen Temperaturen, können nur dadurch erklärt werden, dass durch das mehrfache und lange Erwärmen molekulare Veränderungen im Eisendraht hervorgerufen werden. Zwar wird durch Überschreiten der Entmagnetisierungstemperatur des Eisens auch sein magnetischer



○ Punkte erster Beobachtungen.
× Punkte von Wiederholungen.

Fig. 6.

Zustand verändert. Garbasso, Cantone u. a. haben aber nachgewiesen, dass die Magnetisierung nur in ganz geringem Masse widerstandsvergrössernd wirkt.

Nach diesen genauen und zuverlässigen Messungen am Eisendraht Nr. 4 ist es leicht, die Unregelmässigkeiten, die sich beim ersten Objekt und z. T. auch beim zweiten und dritten gezeigt haben, zu erklären: Wie schon bemerkt, waren die Drähte Nr. 1 und 2 beim Herausnehmen aus dem Porzellanrohr nach den Versuchen an der Oberfläche ganz „verkohlt", d. h. der während dem Experiment bei undichten Stellen eingedrungene Sauerstoff hatte eine Oxydation des Drahtes ermöglicht, wodurch aber der Querschnitt ($d = 0{,}1$ mm; $q = 0{,}0078$ mm^2) beständig verkleinert, also der totale Widerstand vergrössert wurde. Diese Vergrösserung war eine so starke, dass durch sie die, durch die molekulare Veränderung bedingte Widerstandsverkleinerung von ca. 30 % ganz kompensiert wurde und der Draht ausserdem noch eine ganz erhebliche Widerstandsvergrösserung erfuhr. Nachdem es mir gelungen war, beim Eisendraht Nr. 4 jeden Luftzutritt ganz zu verhindern, zeigte sich diese störende Erscheinung nicht mehr.

Tatsächlich konnte am Schluss der Messungen beim Öffnen des Porzellanrohres konstatiert werden, dass der Draht Nr. 4 völlig unversehrt und blank wie beim Einsetzen geblieben war.

C. Widerstandsmessung an einem Nickeldraht.

Zu weitern Untersuchungen habe ich einen Nickeldraht von 120 cm Länge und 0,12 mm Dicke auf ein Glimmerkreuz gewickelt und sonst alle Anordnungen genau gleich getroffen wie bei den Messungen an den Eisendrähten.

Beim Schmelzpunkt des Eises war:

$$t = 0^0\text{:}\quad w_{Ni} = 8{,}1358\ \Omega.$$

Hierauf wurde der Draht viermal nacheinander auf Temperaturen bis gegen 1000° gebracht und ein bis zwei Stunden so gelassen und dann wieder langsam abgekühlt. Bei diesen periodischen Temperaturänderungen wurden folgende Grössen gemessen:

1)	$t = 17^0{,}5$:	$w_{Ni} = 8{,}767\ \Omega$;	2)	$t = 870^0{,}0$:	$w_{Ni} = 44{,}10\ \Omega$
3)	17,6	7,820	4)	1009,0	43,90
5)	17,6	7,562	6)	1008,7	44,3
7)	17,5	7,446	8)	991,7	43,6
9)	17,5	7,368.			

Nach diesen Versuchen wurde zu den definitiven Messungen geschritten, deren Ergebnisse in Tabelle 4 aufgezeichnet sind.

Tabelle 4.

I	Platin				Nickel				t
	R	s	*Korr.*	w	R	s	*Korr.*	w	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	°C
					4,2	— 61,7			
							0,0738	4,2738	— 78,73
					4,3	+ 21,9			
					6,7	— 27,4			
							0,0457	6,7457	0
					6,8	+ 32,4			
	3,1	— 5,0			8,6	+ 8,2			
3,26			0,0085	3,1085			−0,0132	8,5868	54,3
	3,2	+ 53,8			8,7	+ 70,6			
	3,5	— 20,2			10,0	— 49,0			
4,61			0,0372	3,5372			0,0917	10,092	98,0
	3,6	+ 34,2			10,1	+ 4,4			
	4,0	— 41,0			12,3	— 32,1			
5,84			0,0677	4,0677			0,0522	12,352	152,8
	4,1	+ 20,0			12,4	+ 29,4			
	4,5	— 14,9			14,4	— 54,5			
6,80			0,0196	4,5196			0,0817	14,482	200,3
	4,6	+ 61,1			14,5	+ 12,2			
	4,9	— 59,5			16,9	— 60,8			
7,60			0,0855	4,9855			0,0717	16,972	250,0
	5,0	+ 10,1			17,0	+ 24,1			
	5,4	— 31,0			19,9	— 51,2			
8,30			0,0495	5,4495			0,0792	19,979	300,4
	5,5	+ 31,6			20,0	+ 13,4			
	5,9	0,0			23,4	— 35,8			
8,97			0,0000	5,9000			0,0486	23,449	350,0
	6,0	+ 57,3			23,5	+ 37,8			
	6,3	— 32,8			27,4	— 26,0			
9,83			0,0452	6,3452			0,0468	27,447	399,9
	6,4	+ 39,8			27,5	+ 29,5			
	6,8	— 3,1			30,2	— 19,0			
10,53			0,0046	6,8046			0,039	30,239	452,3
	6,9	+ 64,2			30,3	+ 29,9			
	7,1	— 49,8			31,7	— 11,6			
10,90			0,0770	7,1770			0,015	31,715	495,6
	7,2	+ 14,9			31,8	+ 68,0			
	7,6	— 36,6			33,4	— 4,1			
11,82			0,0650	7,6650			0,006	33,406	553,2
	7,7	+ 19,8			33,5	+ 62,0			
	8,0	— 26,2			34,6	— 30,7			
12,60			0,0486	8,0486			0,058	34,658	599,4
	8,1	+ 27,7			34,7	+ 22,1			

Tabelle 4 (Fortsetzung).

I	Platin				Nickel				t
	R	s	*Korr.*	w	R	s	*Korr.*	w	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	°C
	8,4	— 17,3			35,8	— 20,9			
13,10			0,0337	8,4337			0,045	35,845	646,6
	8,5	+ 34,1			35,9	+ 25,7			
	8,8	— 54,8			37,2	— 28,0			
14,32			0,0813	8,8813			0,053	37,253	702,4
	8,9	+ 12,7			37,3	+ 25,2			
	9,2	— 34,6			38,4	— 6,4			
14,58			0,0527	9,2527			0,012	38,412	757,4
	9,3	+ 31,0			38,5	+ 45,8			
	9,6	— 29,7			39,6	— 15,4			
15,30			0,0485	9,6485			0,039	39,639	801,0
	9,7	+ 31,5			39,7	+ 24,5			
	10,0	— 7,1			40,7	— 32,2			
16,20			0,0122	10,0122			0,078	40,778	849,1
	10,1	+ 50,9			40,8	+ 13,3			
	10,3	— 45,6			41,9	+ 0,7			
17,00			0,0804	10,3804			— 0,002	41,898	898,8
	10,4	+ 11,1			42,0	+ 44,1			
	10,5	— 34,8			42,4	— 27,0			
17,30			0,0642	10,5642			0,065	42,465	924,0
	10,6	+ 19,3			42,5	+ 14,4			
	11,1	— 35,4			44,2	— 7,0			
18,80			0,0702	11,1702			0,018	44,218	1009,0
	11,2	+ 15,0			44,3	+ 31,0			

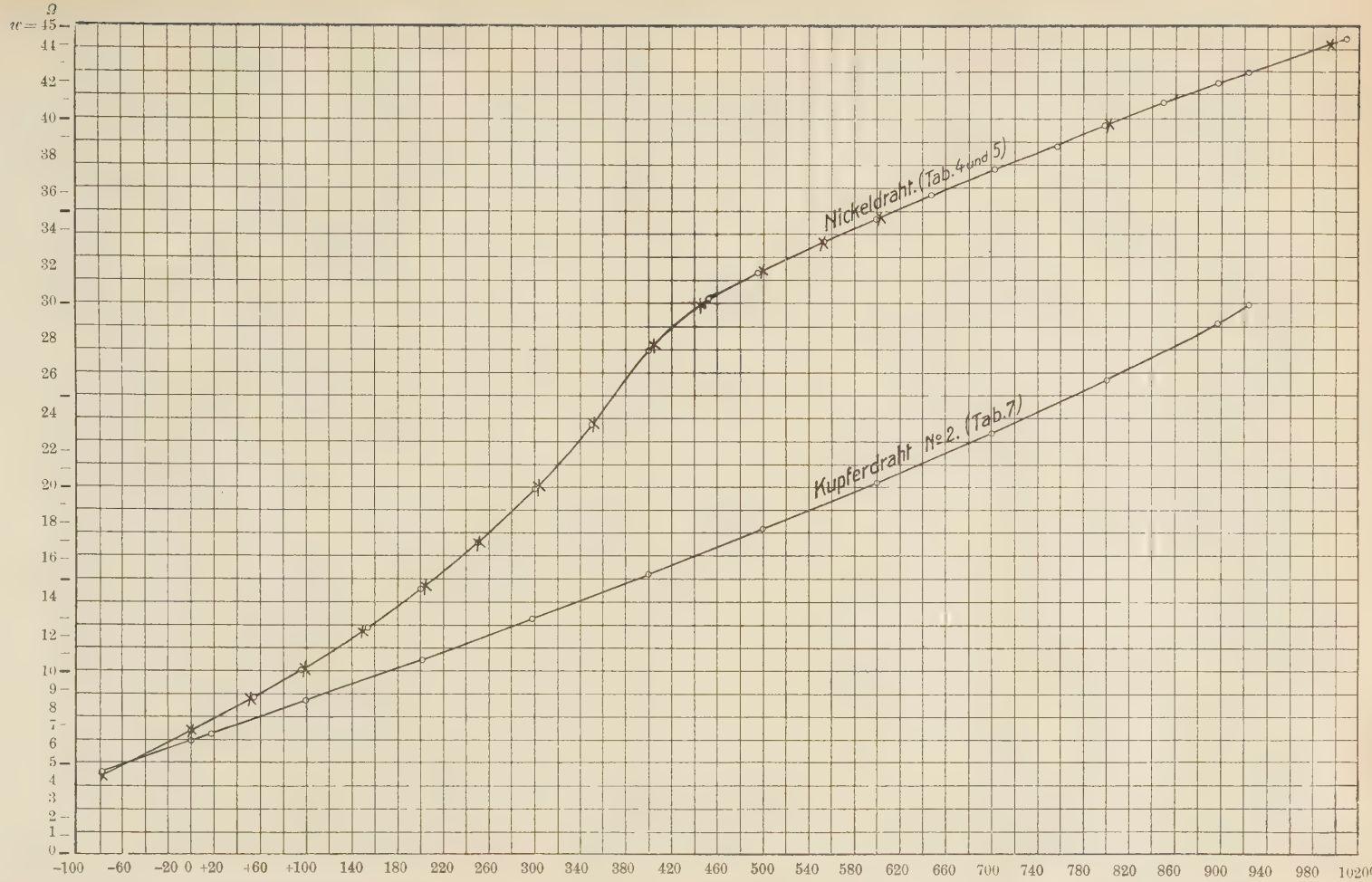
Nach langsamer Abkühlung hat sich sodann bei Zimmertemperatur ergeben:

$$t = 17°,6: \; w_{Ni} = \overset{\Omega}{7,339}.$$

Um zu prüfen, ob bei nochmaliger Erwärmung die Verhältnisse die gleichen seien, wurde, unter sonst gleichen Umständen, eine weitere Beobachtungsreihe aufgenommen, deren Hauptergebnisse sich in Tabelle 5 vorfinden.

Zeichnet man die Kurven, die sich aus den Tabellen 4 und 5 ergeben, so sieht man sofort, dass sie sich genau decken (vergl. Fig. 7).

Vergleicht man die entsprechenden Kurven in Fig. 6 und 7 für Eisen- und Nickeldraht, so erkennt man sofort, dass hier wie dort der Widerstand mit zunehmender Temperatur gewissen Unregelmässigkeiten unterworfen ist, was bei der Kurve für den Kupfer-



○ Punkte erster Beobachtungen.

Fig. 7.

× Punkte von Wiederholungen.

draht nicht konstatiert werden kann. Während indessen der Wendepunkt in der Eisenwiderstandskurve in der Gegend von 790° C auf-

Tabelle 5.

w_{Pt}	w_{Ni}	t
Ω	Ω	°C
—	4,2738	— 78,73
—	6,7457	0
3,0730	8,4730	+ 50,7
3,5353	10,139	97,8
4,0342	12,109	149,3
4,5453	14,730	203,0
4,9838	16,994	249,8
5,4593	20,129	301,4
5,9124	23,407	351,4
6,3855	27,803	404,5
6,7930	30,130	451,0
7,2108	31,801	499,5
7,6590	33,343	552,5
8,0597	34,739	600,8
9,6509	39,736	801,4
11,0680	43,906	994,4

tritt, kann ein solcher in der entsprechenden Kurve für Nickel schon bei ca. 370° C erkannt werden.

Diese merkwürdigen Erscheinungen sollen in einem spätern Abschnitt (IV. B) dieser Arbeit eingehender diskutiert werden.

D. Widerstandsmessungen an Kupferdrähten.

1. Kupferdraht Nr. 1.

Nachdem nun für Eisen und Nickel, d. h. zwei magnetisierbare Metalle gründliche Untersuchungen vorliegen, musste es interessieren, auch die Verhältnisse bei nichtmagnetisierbaren Metallen kennen zu lernen.

Zu dem Zweck wickelte ich einen 65,8 cm langen, blanken Kupferdraht von 0,0497 mm Dicke von Siemens und Halske in Berlin auf ein, wie bis anhin verwendetes Glimmerkreuz, das wieder in ein luftdichtes Porzellanrohr eingesetzt wurde.

Eine ganze Reihe von Vorversuchen zeigte mir, dass der im luftleeren Raum befindliche Kupferdraht nach mehreren periodischen Erwärmungen und Abkühlungen seinen Widerstand nicht bleibend verändert. Dabei habe ich freilich die Temperatur von 950° C

nie überschritten und zwar mit Rücksicht auf die Schmelztemperatur des Kupfers ($t = 1084^0$).

Ferner hat sich bald herausgestellt, dass der Widerstand des Kupferdrahtes über lange Temperaturintervalle hin fast proportional mit der Temperatur wächst. Gestützt darauf konnte ich mich beschränken, die Temperatur- und Widerstandsmessungen in grössern Intervallen als bis anhin auszuführen.

In umstehender Tabelle 6 sind die Ergebnisse zusammengestellt, die ich bei der Untersuchung des Kupferdrahtes Nr. 1 nach bisheriger Methode erhalten habe.

Am Tage nach diesen Messungen hat sich gezeigt, dass der Kupferdraht während der Abkühlung durchgerissen war. Es gelang mir indessen, die beiden Enden zu verlöten und den Draht wieder ins Porzellanrohr einzusetzen, um seinen Widerstand wenigstens noch bei der Schmelztemperatur des Eises zu messen. Es ergab sich für: $t = 0^0$: $w_{Cu} = 5{,}744\ \Omega$.

Bei Beginn der Messungen war für $t = 0^0$: $w_{Cu} = 5{,}660\ \Omega$ gemessen worden. Die Vergrösserung um $0{,}084\ \Omega$ oder 1,5 % ist eine sehr geringe und kann sehr wohl von der durch den Bruch nötig gewordenen Lötstelle herrühren.

Zu weitern Messungen eignete sich dieser Kupferdraht nicht mehr wegen des relativ tiefen Schmelzpunktes des Zinnes, das zur Lötung verwendet worden war.

Ich untersuchte daher einen neuen Kupferdraht von ähnlichen Dimensionen.

2. Kupferdraht Nr. 2.

Dieser zweite Kupferdraht, den ich zur Vervollständigung meiner Resultate untersucht habe, besass eine Länge von 73,2 cm und eine Dicke von 0,0497 mm. Die an ihm gemessenen Grössen finden sich in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Die Abkühlung nach der höchsten Temperatur ging diesmal unter normalen Verhältnissen vor sich. Nach Schluss derselben wurde bei Zimmertemperatur gemessen:

$$t = 18^0{,}4: \ w_{Cu} = 6{,}5390\ \Omega.$$

Auch dieser Draht war nach Schluss des Versuches vollständig intakt und hatte die blanke, rote Oberfläche beibehalten.

Die graphische Darstellung der Resultate dieses Kupferdrahtes befindet sich in Fig. 7.

Tabelle 6.

I	Platin				Kupfer				t
	R	s	*Korr.*	w	R	s	*Korr.*	w	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	° C
					3,8	— 5,8			
							0,0058	3,8058	— 78,56
					3,9	+ 93,6			
					5,6	— 40,4			
							0,0600	5,6600	0
					5,7	+ 27,0			
	3,5	— 39,1			7,8	— 56,4			
4,80			0,0542	3,5542			0,0704	7,8704	99,7
	3,6	+ 33,1			7,9	+ 23,7			
	4,5	— 30,8			10,0	— 35,1			
6,92			0,0441	4,5441			0,059	10,059	202,9
	4,6	+ 39,1			10,1	+ 24,1			
	5,4	— 30,7			12,1	— 20,9			
8,27			0,0413	5,4413			0,031	12,131	299,4
	5,5	+ 43,6			12,2	+ 46,1			
	6,3	— 36,9			14,4	— 49,3			
9,80			0,0584	6,3584			0,067	14,467	401,4
	6,4	+ 26,3			14,5	+ 27,7			
	7,2	— 22,0			16,9	— 43,9			
11,28			0,0402	7,2402			0,075	16,975	503,0
	7,3	+ 32,7			17,0	+ 14,9			
	8,0	— 38,7			19,7	— 23,6			
12,65			0,0552	8,0552			0,030	19,730	600,2
	8,1	+ 31,5			19,8	+ 54,3			
	8,8	— 40,4			22,4	— 21,2			
14,30			0,0646	8,8646			0,033	22,433	700,3
	8,9	+ 22,1			22,5	+ 41,9			
	9,6	— 30,3			25,1	— 49,7			
15,75			0,0550	9,6550			0,097	25,197	801,9
	9,7	+ 24,8			25,2	+ 1,3			
	10,4	— 3,6			28,0	— 43,0			
17,18			0,0073	10,4073			0,000	28,100	902,5
	10,5	+ 45,7			28,1	0			

Tabelle 7.

I	Platin				Kupfer				*t*
	R	*s*	*Korr.*	*w*	*R*	*s*	*Korr.*	*w*	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	°C
	—	—			4,4	— 88,4			
—			—	—			0,0828	4,4828	— 78,63
	—	—			4,5	+ 18,3			
	—	—			6,1	— 64,5			
—			—	—			0,0750	6,1750	0
	—	—			6,2	+ 21,5			
	2,7	— 33,4			6,5	— 49,3			
—			0,0384	2,7384			0,0400	6,5400	17,1
	2,8	+ 53,7			6,6	+ 74,0			
	3,5	— 38,8			8,3	— 54,5			
4,90			0,0531	3,5531			0,0607	8,3607	99,6
	3,6	+ 34,3			8,4	+ 35,3			
	4,5	— 23,7			10,6	— 36,9			
6,93			0,0322	4,5322			0,048	10,648	201,6
	4,6	+ 50,0			10,7	+ 39,3			
	5,4	— 26,0			12,8	— 45,5			
8,20			0,0308	5,4308			0,066	12,866	298,3
	5,5	+ 58,0			12,9	+ 23,1			
	6,3	— 27,9			15,2	— 61,7			
9,80			0,0400	6,3400			0,076	15,276	399,4
	6,4	+ 41,8			15,3	+ 19,8			
	7,2	— 8,5			17,7	— 55,2			
11,13			0,0138	7,2138			0,073	17,773	499,9
	7,3	+ 53,0			17,8	+ 20,6			
	8,0	— 38,7			20,3	— 28,5			
12,60			0,0553	8,0553			0,041	20,341	600,2
	8,1	+ 31,3			20,4	+ 41,2			
	8,8	— 45,0			22,9	— 48,1			
13,84			0,0643	8,8643			0,068	22,968	700,2
	8,9	+ 25,0			23,0	+ 22,5			
	9,6	— 26,1			25,8	— 53,4			
14,20			0,0415	9,6415			0,076	25,876	800,1
	9,7	+ 36,8			25,9	+ 17,2			
	10,3	— 45,1			28,8	— 43,9			
16,60			0,0776	10,3776			0,073	28,873	896,5
	10,4	+ 13,0			28,9	+ 16,3			
	10,5	— 34,0			29,8	— 38,1			
17,00			0,0604	10,5604			0,078	29,878	923,9
	10,6	+ 22,3			29,9	+ 11,1			

E. Widerstandsmessungen an Wismutdrähten.

1. Wismutdraht Nr. 1.

Zum Schluss stellte ich mir noch die Aufgabe, die Beziehungen zu studieren, die zwischen Temperatur und Widerstand eines diamagnetischen Metalles, des Wismuts, auftreten.

Des grossen spezifischen Widerstandes wegen brauchte ich hier nur einen kurzen Draht zu wählen. Seine Länge betrug 29,0 cm, seine Dicke 0,17 mm. Ich wickelte ihn nicht spiralig, sondern in der Längsrichtung des Glimmerkreuzes, so dass er, wie die frühern Objekte, einen gleich langen Raum in Anspruch nahm. Das Zusammenlöten der Enden mit den Platindrähten geschah vermittelst Zinn. Da die Schmelztemperaturen für Zinn (232°) und Wismut (269°) nahe aneinander liegen, war es mit ausserordentlichen Schwierigkeiten verbunden, die Lötung auszuführen, ohne dass der Wismutdraht schon während derselben abschmolz. Indessen ist mir der Versuch doch zweimal gelungen, so dass ich einige Messungen ausführen konnte, deren Resultate in den Tabellen 8 und 9 zusammengestellt sind.

Tabelle 8.

I	Platin				Wismut				t
	R	s	*Korr.*	w	R	s	*Korr.*	w	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	°C
	—	—			11,1	— 8,3			
—			—	—			0,008	11,108	— 78,88
	—	—			11,2	+ 90,6			
	—	—			15,6	— 49,2			
—			—	—			0,052	15,652	0
	—	—			15,7	+ 45,2			
	2,7	— 49,0			16,7	— 31,4			
—			0,0457	2,7457			0,038	16,738	17,8
	2,8	+ 58,1			16,8	+ 50,4			
	3,0	— 58,1			18,6	— 49,7			
2,80			0,0617	3,0617			0,075	18,675	49,6
	3,1	+ 36,1			18,7	+ 17,0			
	3,5	— 46,4			22,0	— 40,7			
4,65			0,0605	3,5605			0,054	22,054	100,4
	3,6	+ 30,3			22,1	+ 34,4			

Bei weiterer Steigerung der Temperatur ist der Draht zerrissen, obwohl ich schon bei der Wicklung besonders darauf geachtet hatte, gefährliche Spannungen zu vermeiden.

2. Wismutdraht Nr. 2.

Da es mir mit dem ersten Wismutdraht nicht gelungen war, höhere Temperaturen als 100° C zu erreichen, versuchte ich das gleiche Experiment mit einem neuen Draht von 30,0 cm Länge und 0,17 mm Dicke.

Tabelle 9 gibt die dabei erzielten Resultate.

Tabelle 9.

I	Platin				Wismut				*t*
	R	*s*	*Korr.*	*w*	*R*	*s*	*Korr.*	*w*	
Amp.	Ω	mm	Ω	Ω	Ω	mm	Ω	Ω	°C
	—	—			11,2	— 70,3			
—			—	—			0,081	11,281	— 78,78
	—	—			11,3	+ 16,9			
	—	—			15,9	— 17,8			
—			—	—			0,022	15,922	0
	—	—			16,0	+ 63,9			
	2,7	— 66,8			17,0	— 34,9			
—			0,0644	2,7644			0,028	17,028	19,7
	2,8	+ 37,1			17,1	+ 90,7			
	3,0	— 67,4			19,0	— 15,5			
2,80			0,0653	3,0653			0,019	19,019	49,9
	3,1	+ 35,8			19,1	+ 68,2			
	3,5	— 32,3			22,2	— 83,7			
4,60			0,0424	3,5424			0,081	22,281	98,5
	3,6	+ 43,9			22,3	+ 19,1			
	4,0	— 25,4			26,2	— 8,9			
5,80			0,0357	4,0357			0,018	26,218	149,5
	4,1	+ 45,8			26,3	+ 39,7			

Bei weiterer Temperatursteigerung zerriss auch dieser Draht, so dass neue Messungen nicht vorgenommen werden konnten. Graphische Darstellung Fig. 6.

* * *

Hier anschliessend soll noch der Einfluss untersucht werden, der durch die bei hohen Temperaturen veränderte Leitfähigkeit des Glimmers auf die gefundenen Resultate ausgeübt werden könnte.

Zu dem Zwecke habe ich ein Glimmerplättchen von 18 mm Länge, 15 mm Breite und 0,32 mm Dicke an den Enden mit zwei Platindrähten solid verbunden, in der Mitte des Heizrohres gut isoliert aufgehängt und in einen mit Galvanometer und Element versehenen,

ebenfalls gut isolierten Stromkreis eingeschaltet. Da die Leitfähigkeit des Porzellans bei hohen Temperaturen beträchtlich zunimmt, wurde namentlich sorgfältig darauf geachtet, dass im Innern des Heizrohres nirgends eine Berührung mit Glimmer und Leitungsdrähten stattfand. Die Bestimmung des Widerstandes vollzog sich durch Messung von Stromstärke und Spannung. Infolge der ausserordentlich grossen Widerstände bedurfte es auch eines äusserst empfindlichen Strommessers. Das benutzte Drehspulengalvanometer hatte bei einer Entfernung von 160 cm zwischen Spiegel und Skala eine Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-9}$ Ampères. Der innere Widerstand des Apparates betrug 900 Ohm.

Zur Messung des Glimmerwiderstandes selbst wurde die E. M. K. von 250 Bleiakkumulatoren verwendet.

Bei Zimmertemperatur wurde gefunden:

$$i = \overset{a}{0{,}000\,007\,87} \qquad \Delta p = \overset{v}{511{,}8} \qquad w = \overset{\Omega}{65\,049\,000.}$$

Bei der Temperatur von 800° C:

$$i = \overset{a}{0{,}000\,115} \qquad \Delta p = \overset{v}{511{,}8} \qquad w = \overset{\Omega}{4\,430\,000.}$$

Bei der Temperatur von 900° C:

$$i = \overset{a}{0{,}000\,359} \qquad \Delta p = \overset{v}{511{,}8} \qquad w = \overset{\Omega}{1\,426\,000.}$$

Bei der Temperatur von 950° C:

$$i = \overset{a}{0{,}000\,396} \qquad \Delta p = \overset{v}{511{,}8} \qquad w = \overset{\Omega}{1\,293\,000.}$$

Aus diesen Resultaten geht hervor, dass der Widerstand des Glimmerplättchens bei einer Temperatursteigerung auf 950° C um das zirka fünfzigfache abnimmt, während derjenige des Eisendrahtes unter den gleichen Umständen um das zirka zwölffache zunimmt. Dementsprechend müsste der Widerstand der als Träger verwendeten Glimmerkreuze bei 950° C den Wert von 518 000 Ohm annehmen (60 mm Länge und 40 mm^2 Querschnitt). Der aufgewickelte Eisendraht hatte einen Maximalwiderstand von ca. $\overset{\Omega}{130,}$ so dass der durch ihn fliessende, zur Messung benützte Strom durch das Glimmerkreuz eine Schwächung von höchstens 0,02 Prozent seines Normalwertes erfahren konnte. Der Einfluss auf die gemessenen Widerstandsgrössen ist also ein derart kleiner, dass er ohne Bedenken vernachlässigt werden darf.

IV. Analytischer Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand.

A. Bestimmungsmethode.

Ganz ähnlich, wie man in Abschnitt II, C den Widerstand des Platindrahtes als Funktion seiner Temperatur dargestellt hat, kann man das für jedes beliebige andere Metall tun.

Der einfachste, und wohl auch bequemste Ansatz hiefür ist die Potenzreihe:

$$w_t = w_o (1 + a t + b t^2 + c t^3 + \ldots\ldots), \qquad (8)$$

worin w_t den Widerstand bei der Temperatur t^0, und w_o denjenigen bei 0^0 darstellt, und $a, b, c \ldots$ von der Natur des Metalles abhängige Konstanten bedeuten. Die Erfahrung lehrt, dass man in den meisten Fällen schon mit der Kenntnis zweier dieser Zahlen (a und b) auskommt, so dass also ist:

$$w_t = w_o (1 + a t + b t^2). \qquad (9)$$

Theoretisch könnten diese beiden Grössen aus den Messungen von zwei beliebigen Temperaturen und der entsprechenden Widerstände berechnet werden, wenn w_o bereits bekannt ist.

Es habe sich z. B. ergeben, dass bei der beliebigen Temperatur t_1 der entsprechende Widerstand w_1 und bei t_2 der Widerstand w_2 betrage, so folgt aus Gleichung (9):

$$w_1 = w_o (1 + a t_1 + b t_1^2) \text{ und ebenso:}$$
$$w_2 + w_o (1 + a t_2 + b t_2^2).$$

In diesen beiden linearen Gleichungen treten als einzige Unbekannten die Grössen a und b auf, die somit bestimmt werden können.

Wird nun diese Berechnung für verschiedene Temperaturen mehrmals durchgeführt, so wird man sofort ersehen, dass im allgemeinen für die Grössen a und b immer etwas verschiedene Werte herauskommen. Diese Verschiedenheiten rühren davon her, dass bei den Beobachtungen immer kleine Fehler gemacht werden, die der Unvollkommenheit der verwendeten Instrumente und unserer Sinne zuzuschreiben sind, und weil die Gleichung (9) die Tatsachen eben nicht genau genug darzustellen vermag.

Es werden ohne Zweifel diejenigen Werte von a und b als die besten bezeichnet werden müssen, die bei der Berechnung für w_t

solche Werte ergeben, die den entsprechenden, beobachteten Grössen am nächsten liegen.

Die Ausgleichungsrechnung zeigt uns Methoden, die es uns ermöglichen, diese wahrscheinlichsten Werte aus den gemachten Beobachtungen zu berechnen. (Methode der kleinsten Quadrate.)

Die im folgenden Abschnitt angegebenen Werte sind sämtlich nach dieser Methode berechnet worden.

B. Resultate.

Nach dieser Rechnungsmethode habe ich aus den Beobachtungswerten der Tabelle 2 für den Eisendraht Nr. 4 für Temperaturen bis zu 780° folgende Werte gefunden:

$$a = 0{,}004\,240 \qquad b = 0{,}000\,009\,904.$$

Zur Berechnung von a und b auch noch höhere Temperaturen heranzuziehen war nicht ratsam, da die Widerstandskurve (vergl. Fig. 6) in der Gegend von 790° einen Wendepunkt hat, und der weitere Verlauf sich durch eine Potenzreihe von nur drei Gliedern doch nicht gut darstellen liesse.

Berechnet man jetzt mit den gefundenen Werten von a und b den Widerstand für die gleichen Temperaturen, bei denen er direkt gemessen worden ist, so sieht man, dass bis gegen 200° sehr grosse Differenzen auftreten, während für höhere Temperaturen die beobachteten und berechneten Werte ziemlich gut übereinstimmen.

Ich sah mich deshalb veranlasst, für die beiden Intervalle von −78° bis 200° und von 250° bis 780° verschiedene Werte von a und b zu berechnen.

Dabei habe ich gefunden:

Für $t = -78°$ bis $+200°$: $a = 0{,}005\,487$; $b = 0{,}000\,004\,592$.
Für $t = 250°$ bis $780°$: $a = 0{,}004\,241$; $b = 0{,}000\,009\,904$.

Für den gleichen Eisendraht habe ich ferner die Koeffizienten a und b berechnet, die sich aus der Tabelle 1 ergeben, d. h. aus den Messungen, die gemacht wurden, als man den Eisendraht zum erstenmal auf höhere Temperaturen brachte.

Auch hier habe ich, aus dem gleichen Grunde wie im vorigen Fall, die Berechnung für kleinere und grössere Temperaturen getrennt vorgenommen und dabei gefunden:

Für $t = -191°$ bis $+200°$: $a = 0{,}003\,880$; $b = 0{,}000\,002\,531$.
Für $t = 250°$ bis $750°$: $a = 0{,}003\,012$; $b = 0{,}000\,006\,196$.

Für den Nickeldraht zeigt Fig. 7 deutlich, dass die Widerstandskurve in der Gegend von 370° ebenfalls einen Wendepunkt

aufweist. Aus dem Grund habe ich auch hier die Berechnung von a und b getrennt vorgenommen für die Temperaturen bis zu 400° einerseits, und für solche über 500° anderseits (Tab. 4). Dabei hat sich ergeben:

Für $t = -78°$ bis $+400°$: $a = 0{,}004\,149$; $b = 0{,}000\,008\,461$.
Für $t = 500°$ bis $1009°$: $a = 0{,}009\,337$; $b = -0{,}000\,003\,928$.

Die Widerstandskurve für den Kupferdraht Nr. 2 (vergl. Fig. 7) zeigt in ihrem ganzen Verlauf keine Unregelmässigkeit, die eine gesonderte Berechnung der Koeffizienten für tiefere und höhere Temperaturen verlangen könnte. Aus der Berechnung (Tab. 7) sind folgende Grössen hervorgegangen:

Für $t = -78°$ bis $924°$: $a = 0{,}003\,331$; $b = 0{,}000\,000\,853$.

Endlich habe ich für den Wismutdraht Nr. 2 im Temperaturintervall von $-78°$ bis $+150°$ nach Tabelle 9 folgende Werte gefunden:

$$a = 0{,}003\,917; \qquad b = 0{,}000\,002\,254.$$

Demnach würden sich nun für die untersuchten Metalle folgende Widerstandsformeln ergeben:

1. Für den erstmalig erwärmten Eisendraht Nr. 4:

A. $t = -191°$ bis $+200°$ C:

$$w_t = 14{,}900\ \Omega\ (1 + 0{,}003\,880\,t + 0{,}000\,002\,531\,t^2).$$

B. $t = 250°$ bis $750°$:

$$w_t = 14{,}900\ \Omega\ (1 + 0{,}003\,012\,t + 0{,}000\,006\,196\,t^2).$$

2. Für den mehrmals erwärmten Eisendraht Nr. 4:

A. $t = -78°$ bis $200°$:

$$w_t = 10{,}193\ \Omega\ (1 + 0{,}005\,487\,t + 0{,}000\,004\,592\,t^2).$$

B. $t = 250°$ bis $780°$:

$$w_t = 10{,}193\ \Omega\ (1 + 0.004\,241\,t + 0{,}000\,009\,904\,t^2).$$

3. Für den Nickeldraht:

A. $t = -78°$ bis $400°$:

$$w_t = 6{,}7457\ \Omega\ (1 + 0{,}004\,149\,t + 0{,}000\,008\,461\,t^2).$$

B. $t = 500°$ bis $1009°$:

$$w_t = 6{,}7457\ \Omega\ (1 + 0{,}009\,337\,t - 0{,}000\,003\,928\,t^2).$$

4. Für den Kupferdraht Nr. 2:

A. $t = -78°$ bis $+924°$:

$$w_t = 6{,}175\ \Omega\ (1 + 0{,}003\,331\,t + 0{,}000\,000\,853\,t^2).$$

5. Für den Wismutdraht Nr. 2:

A. $t = -78^0$ bis $+150^0$:

$$w_t = 15{,}922\ \Omega\ (1 + 0{,}003\,917\ t + 0{,}000\,002\,254\ t^2).$$

Nach diesen Berechnungen ist es interessant zu untersuchen, welchen relativen Änderungen der Widerstand der einzelnen Metalle bei den verschiedenen Temperaturen unterworfen ist, d. h. um wie viel er sich vergrössert, wenn die Temperatur je um einen Grad Celsius erhöht wird. Diese Beträge können leicht bestimmt werden, indem man in den gewünschten Punkten der jedem Metall entsprechenden Widerstandskurve (Fig. 6 und 7) die zugehörigen Tangenten zieht und den Quotient aus Ordinate und Subtangente berechnet. Dies ist für eine Reihe von Temperaturen für Eisen, Nickel und Kupfer ausgeführt und die Resultate in folgenden drei Tabellen Nr. 10, 11 und 12 zusammengestellt worden:

Tabelle 10.
Eisenwiderstand Nr. 4.

t	w	Wid.-Zunahme pro 1° C Temp.-Erhöhung
°C	Ω	Ω
— 78	6,0	0,050
0	10,2	0,056
+ 100	16,1	0,064
220	25,0	0,084
300	32,4	0,102
400	43,4	0,118
500	56,5	0,142
600	72,0	0,160
700	89,8	0,196
750	99,8	0,216
800	111,3	0,214
810	113,3	0,192
820	115,2	0,176
860	120,5	0,098
900	123,8	0,053
950	126,0	0,032
1000	127,5	0,028

Tabelle 11.
Nickelwiderstand.

t	w	Wid.-Zunahme pro 1° C Temp.-Erhöhung
°C	Ω	Ω
— 78	4,2	0,031
0	6,7	0,033
+ 100	10,2	0,039
200	14,5	0,049
250	17,0	0,055
300	20,0	0,063
325	21,6	0,072
350	23,4	0,079
370	25,1	0,087
400	27,4	0,070
425	29,0	0,056
450	30,1	0,046
500	31,7	0,031
600	34,7	0,027
700	37,2	0,025
800	39,6	0,024
900	41,9	0,022
1000	44,0	0,022

Um auch hier ein übersichtliches Bild über die Variabilität dieser Widerstandszunahmen zu geben, habe ich in den Fig. 8, 9 und 10 die Ergebnisse graphisch dargestellt. Als Abszissen wurden die

Tabelle 12.
Kupferwiderstand Nr. 2.

t	w	Wid.-Zunahme pro 1° C Temp.-Erhöhung
° C	Ω	Ω
— 78	4,5	0,0218
0	6,2	0,0218
+ 100	8,4	0,0218
200	10,6	0,0226
300	13,0	0,0234
400	15,3	0,0241
500	17,8	0,0250
600	20,3	0,0262
700	23,0	0,0277
800	25,9	0,0302
900	29,0	0,0344

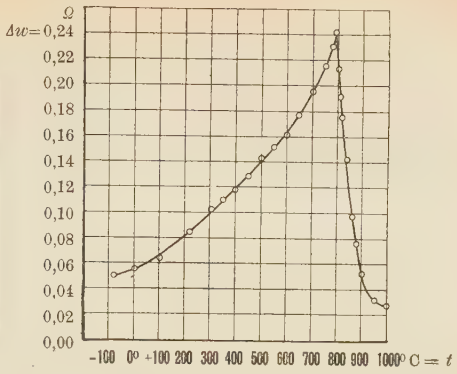


Fig. 8. — Eisen Nr. 4.
Δw = Widerstandszunahme pro 1° C Temperaturerhöhung.

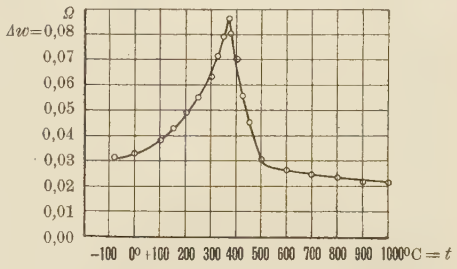


Fig. 9. — Nickel.
Δw = Widerstandszunahme pro 1° C Temperaturerhöhung.

Temperaturen und als Ordinaten die jeweiligen Widerstandszunahmen pro 1° C Temperaturerhöhung aufgetragen. Der wahrscheinlichste Verlauf der Kurven ist leicht zu erkennen, wenn auch nicht alle Punkte mit der wünschenswerten Genauigkeit bestimmt werden konnten.

Besonders deutlich tritt dabei zutage die plötzliche Veränderung der Widerstandszunahme bei der Temperatur von 790° für Eisen und bei 370° für Nickel, während ein solcher Umkehrpunkt beim Kupfer nicht nachgewiesen werden kann.

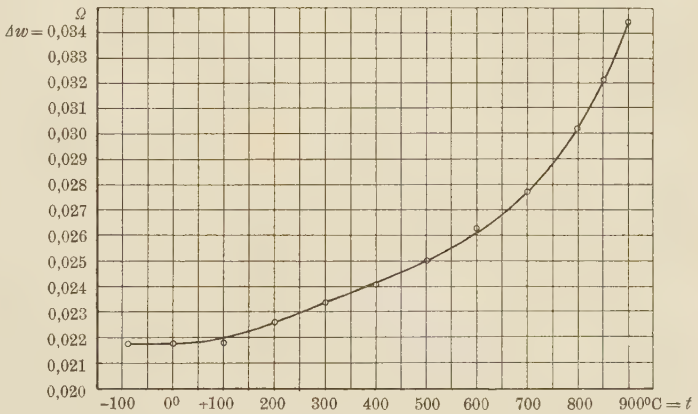


Fig. 10. — Kupfer Nr. 2.
Δw = Widerstandszunahme pro 1° C Temperaturerhöhung.

Auch aus diesen Betrachtungen geht deutlich *das anormale*

Verhalten der beiden magnetischen Metalle Eisen und Nickel hervor: Die relativen Widerstandszunahmen sind bis zu den ihren Metallen entsprechenden Entmagnetisierungstemperaturen starken Steigerungen unterworfen. Sind jene einmal erreicht, so erleidet das Metall plötzlich eine molekulare Umänderung, die zur Folge hat, dass fast alle seine physikalischen Eigenschaften ebenfalls verändert werden, insbesondere die, dass die relativen Widerstandszunahmen von sehr grossen plötzlich auf kleine Werte zurücksinken.

Zum Schluss dieses Abschnittes möchte ich auch noch zum Vergleich die Versuchsresultate anführen, die in den letzten Jahren auf diesem und verwandten Gebieten von verschiedenen Forschern erzielt worden sind:

Ernst Lecher[1]) hat im Jahre 1908 an Eisen- und Nickeldrähten im Vakuum bei hohen Temperaturen die spezifische Wärme bestimmt und zu diesem Zweck gleichzeitig den elektrischen Leitungswiderstand gemessen, aber für beide Grössen nur relative Werte angegeben. Er hat beispielsweise gefunden:

Nickel im Vakuum.

Temperatur	Widerstand	Spez. Wärme
23° C	925	4776
221	1840	5660
320	2534	6604
331	2630	6773
354	2828	7265
390	3022	6284
454	3238	6323
471	3298	6387
501	3368	6173
723	3997	6143

Eisen im Vakuum.

Temperatur	Widerstand	Spez. Wärme
24° C	473	564
198	915	801
318	1326	1030
560	2436	1333
656	2982	1491
744	3429	1713
850	4010	1517
948	4210	1260
25	476	558

Indem Lecher sein Hauptaugenmerk auf die Veränderungen der spez. Wärme richtet, kommt er zum Schluss, dass das Eisen bei einer Temperatur von 750° einen Umwandlungspunkt haben müsse. Er weist ferner darauf hin, dass Le Chatelier[2]) schon 1899 für Eisen mit 0,5 % Kohle eine Umwandlungstemperatur von 728° C erhalten hat und zwar aus den Untersuchungsresultaten über den Ausdehnungskoeffizienten.

[1]) Wiener Sitzungsberichte, Bd. 117, II[a].
[2]) Comptes Rendus 129.

Harrison[1]) hat ferner im Jahre 1904 gezeigt, dass die Permeabilität des Eisens bei 760° C plötzlich zu sinken beginnt, und bei 855° gänzlich verschwindet.

Nähere Untersuchungen an Nickel hat A. Batelli[2]) im Jahre 1888 vorgenommen. Ein kleiner Auszug aus seinen Resultaten zum Vergleich mit meinen entsprechenden Grössen (siehe p. 39) möge hier folgen:

$t = 0°$ bis $220°$: $a = 0{,}003\,981$; $b = -0{,}000\,0022$.
$t = 230°$ bis $360°$: $a = 0{,}004\,352$; $b = -0{,}000\,0018$.
$t = 380°$ bis $410°$: $a = 0{,}003\,322$; $b = -0{,}000\,0012$.

Weitere Versuche über das thermoelektrische Verhalten des Nickels haben ihm bestätigt, dass bei nahezu den gleichen Temperaturen Unregelmässigkeiten sich zeigen, bei denen auch das anormale Verhalten in Bezug auf den Widerstand sich einstellt.

V. Schluss.

Aus den vorliegenden Untersuchungen gehen folgende Tatsachen hervor:

1. Wird ein Eisendraht im luftleeren Raum auf eine Temperatur von ca. 1000° C gebracht und dann langsam abgekühlt, so ist, wieder bei der Anfangstemperatur angelangt, sein elektrischer Widerstand erheblich kleiner geworden. Wird dieses Experiment mehrmals wiederholt, so nähert sich die Widerstandsgrösse bei der Ausgangstemperatur mehr und mehr einem festen Grenzwert, der bis zu 31 % kleiner ist als der Anfangswert.

Nickel zeigt eine ähnliche Eigenschaft, nur beträgt dort der Rückgang höchstens 17 %, während beim Kupfer diese Änderung weniger als 1 % ausmacht.

2. Der elektrische Widerstand eines Eisendrahtes nimmt mit wachsender Temperatur immer rascher zu bis in die Gegend von 790° C. Mit noch höher steigender Temperatur vergrössert sich zwar der Widerstand auch noch, aber in viel geringerem Masse, als unterhalb dieser Temperatur.

Nickel zeigt auch in dieser Beziehung ein ähnliches Verhalten wie das Eisen, nur findet hier die Abbiegung in der Widerstandskurve (vergl. Fig. 7) schon in der Gegend von 370° C statt.

Kupfer weist im ganzen Versuchsintervall von —78° bis 924° keine solche Eigentümlichkeit auf, sondern ergibt eine überall nach unten konvex gekrümmte Kurve.

---

[1]) Phil. Mag. 6 VII.
[2]) Atti della R. Acc. di Torino 22.

Auch beim Wismut ist innerhalb des untersuchten Temperaturintervalles keine Unregelmässigkeit zum Vorschein gekommen.

3. Die Widerstandsvergrösserung von Eisen und Nickel pro ein Grad Temperaturerhöhung nimmt mit steigender Temperatur stetig zu bis zu dem Punkt, bei welchem das Metall seine Magnetisierfähigkeit verliert. Mit weitersteigender Temperatur fällt sodann jene Grösse beider Metalle plötzlich auf ganz geringe Werte herab.

Beim Kupfer ist immer nur ein Steigen, bis 900° C, nie ein Fallen nachweisbar.

* * *

Es ist leicht einzusehen, dass das Eisen, vermöge dieser Eigenschaften, sich als ganz vorzüglicher Stromregulator erweisen wird, wenn es sich darum handelt, in einem Stromkreis mit variabler elektromotorischer Kraft möglichst konstante Stromstärke zu erhalten. Sobald nämlich in einem geschlossenen Kreis, in welchem an irgend einer Stelle Eisen eingeschaltet ist, die elektromotorische Kraft des Stromerregers zu steigen beginnt, wird nach dem Ohmschen Gesetz zunächst auch die Stromstärke wachsen müssen, die ihrerseits, infolge der stärkern Erwärmung des Drahtes (Joulesches Gesetz), eine vermehrte Widerstandsvergrösserung mit sich bringt, also ein weiteres Anwachsen des Stromes verhindert, umsomehr, als die vom Strom produzierte Wärmemenge mit dem Quadrat der Stromstärke direkt proportional ist.

In der Technik finden heute solche Eisenvorschaltwiderstände tatsächlich schon ausgedehnte Verwendung, wie z. B. bei der Nernst'schen Glühlampe, deren Leuchtkörper aus Thoroxyd, Zirkonoxyd etc. erst bei hohen Temperaturen für den elektrischen Strom leitend werden und daher durch eine besondere Einrichtung vorerwärmt werden müssen. Kontrolliert man an einem Ampèremeter, das in den Stromkreis geschaltet wird, in welchem sich eine solche Lampe befindet, die Stromstärke, so kann man konstatieren, dass diese von einer gewissen Grenze an, ohne Vergrösserung der Spannung ganz von selbst zunimmt (infolge der bei höhern Temperaturen bessern Leitfähigkeit der Glühkörper), so, dass nach ganz kurzer Zeit schon der Glühkörper schmilzt. Wird dagegen der Lampe ein Eisenwiderstand vorgeschaltet, so wird jetzt durch ihn ein zu starkes Anwachsen des Stromes verhindert und damit die Lampe auch gesichert.

Bei der Untersuchung einer solchen Nernstlampe mit Eisenvorschaltwiderstand hat sich beispielsweise gezeigt, dass einer Spannungssteigerung von 6,2 Volt auf 20,8 Volt eine Vergrösserung der Stromstärke von 0,248 Amp. auf 0,260 Amp. gefolgt ist, also einer

Spannungszunahme von 235% eine Stromverstärkung von nur 5%. Ein anderer Versuch hat ergeben, dass eine Lampe, deren kritische Spannung auf 200 Volt angegeben war, mit Eisenvorschaltwiderstand bei 240 Volt, also bei einer Überschreitung der Maximalspannung um volle 20%, noch leuchtete, ohne den geringsten Schaden zu nehmen. [1])

Diese Schutzwirkung des Eisenwiderstandes kann ferner zur Sicherung eines ganzen Netzes von Kohlenglühlampen ausgedehnt werden, indem man einen passend dimensionierten Eisendraht direkt hinter die Elektrizitätsquelle schaltet. Dadurch wird aber nicht nur die Lebensdauer sämtlicher Lampen vergrössert, sondern auch die Helligkeit, selbst bei grossen Spannungsschwankungen der Elektrizitätsquelle, fast konstant erhalten, was ebenfalls einen nicht zu unterschätzenden Vorteil bedeutet. Bei der Beleuchtung von Eisenbahnwagen bieten solche Eisendrähte den grossen Vorteil, dass sie von selbst die Ausgleichung der hohen Maschinen- und der tiefen Entladespannung der Akkumulatoren besorgen, und so ein Licht von konstanter Intensität ermöglichen.

Die Wirkungsweise dieser Eisenvorschaltwiderstände ist also, hier wie dort, eine ganz ähnliche wie sie die Pufferbatterien im Strassenbahnbetrieb ausüben, indem sie, wie diese, schädigende Stösse abschwächen.

[1]) O. Bussmann, Zeitschr. f. Elektrotechnik 15 (1903).

Curriculum vitae.

Am 28. Juni 1883 wurde ich, Otto Jakob Schwab, in Grenchen (Kt. Solothurn) geboren als Sohn des Jakob Schwab, Schreinermeisters von Gals (Kt. Bern) und der Rosina geb. Tribolet. Nach Absolvierung der Primar- und Bezirksschulen Grenchen kam ich im Herbst 1899 an die gewerbliche Abteilung der Kantonsschule Solothurn. Im Sommer 1902 bestand ich daselbst die Maturitätsprüfung.

Im Herbst desselben Jahres bezog ich die Fachlehrerabteilung für Mathematik und Physik des eidgen. Polytechnikums und besuchte die mathematischen Vorlesungen der Herren Professoren Dr. A. Hirsch, Dr. A. Hurwitz und Dr. J. Rebstein. Geometrische Fächer belegte ich bei den Herren Professoren Dr. C. F. Geiser und Dr. W. Fiedler, mechanische bei Herrn Prof. Dr. A. Herzog und astronomische bei Herrn Prof. Dr. A. Wolfer. Vorlesungen über Physik und verwandte Gebiete hörte ich bei den Herren Professoren Dr. H. F. Weber und Dr. A. Tobler.

Als Hörer der Universität Zürich bin ich überdies im Sommer-Semester 1911 der Vorlesung über theoretische Optik des Herrn Prof. Dr. Debije gefolgt.

Die mit den entsprechenden Kursen verbundenen Übungen habe ich besucht bei den Herren Professoren Hirsch, Hurwitz, Fiedler, Herzog und Wolfer.

Meine physikalische Laboratoriumstätigkeit begann ich unter der Leitung des Herrn Prof. Dr. P. Weiss und setzte sie fort bei Herrn Prof. Dr. H. F. Weber, unter dessen Leitung auch die vorliegende Dissertation im eidgen. physikalischen Institut ausgeführt worden ist.

Vor meiner Doktorprüfung habe ich im Sommer 1906 die Diplomprüfung als Fachlehrer in mathematisch-physikalischer Richtung am eidgen. Polytechnikum in Zürich bestanden.

Seither bin ich als Assistent für höhere Mathematik und analytische Geometrie an dieser Anstalt tätig und bekleide gegenwärtig ausserdem die Stelle eines Hilfslehrers der Mathematik am kantonalen Gymnasium und der städtischen Gewerbeschule in Zürich.

Inhaltsübersicht.

I. Einleitung 1

II. Versuchsanordnung und Messmethoden 6

A. Beschreibung der Versuchsobjekte 6

B. Herstellung der Temperaturen 7

C. Messung der Temperaturen und Widerstände der zu untersuchenden Metalle 7

III. Praktische Ausführung 12

A. Aichung des Pyrometers 12

B. Widerstandsmessungen an Eisendrähten 14

1. Allgemeine Bemerkungen 14

2. Eisendraht Nr. 1 15

3. „ Nr. 2 17

4. „ Nr. 3 18

5. „ Nr. 4 19

C. Widerstandsmessungen an einem Nickeldraht 26

D. Widerstandsmessungen an Kupferdrähten 30

1. Kupferdraht Nr. 1 30

2. „ Nr. 2 31

E. Widerstandsmessungen an Wismutdrähten 34

1. Wismutdraht Nr. 1 34

2. „ Nr. 2 35

IV. Analytischer Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand 37

A. Bestimmungsmethode 37

B. Resultate 38

V. Schluss 43